



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL DE OLIVEIRA E SOUZA

AVALIAÇÃO DO RUÍDO AEROVIÁRIO NO ENTORNO DO AEROPORTO  
BACACHERI.

CURITIBA  
2019.

DANIEL DE OLIVEIRA E SOUZA

AVALIAÇÃO DO RUÍDO AEROVIÁRIO NO ENTORNO DO AEROPORTO  
BACACHERI.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Titular Dr.-Ing. Paulo H. T. Zannin

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S729a

Souza, Daniel de Oliveira e

Avaliação do ruído aeroviário no entorno do aeroporto Bacacheri [recurso eletrônico] / Daniel de Oliveira e Souza. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2019.

Orientador: Paulo Henrique Trombetta Zannin .

1. Aviões – Ruído. 2. Aviões – Ruído – Legislação. 3. Ruído – Efeito fisiológico. 4. Ruído – Aspectos psicológicos. 5. Aeroportos – Curitiba (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Zannin, Paulo Henrique Trombetta . III. Título.

CDD: 629.132

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
AMBIENTAL - 40001016075P3

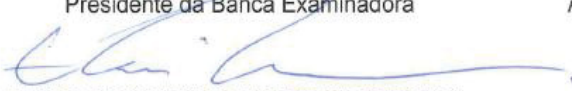
## TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DANIEL DE OLIVEIRA E SOUZA**, intitulada: **AVALIAÇÃO DO RUÍDO AEROVIÁRIO NO ENTORNO DO AEROPORTO BACACHERI**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 15 de Agosto de 2019.

  
PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN  
Presidente da Banca Examinadora

  
EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARANÁ)

  
EDUARDO LEITE KRUGER  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ)



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a meus pais e minha querida avó, que no momento de escassez de emprego me apoiaram e me incentivaram a buscar soluções alternativas de crescimento profissional e pessoal, como o mestrado acadêmico.

Agradeço a minha namorada, Camile Castoldi, que me acompanhou nessa caminhada me cobrando e me apoiando nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus cuscos Luna e Nero que por muito tempo foram minha única companhia e distração em momentos de escuridão, iluminando-os com seu amor e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr.-Ing. Paulo H. T. Zannin que desde o primeiro contato sobre ruído aeroviário se mostrou interessado e solícito, demonstrando animação com o potencial do trabalho, além de exercer seu papel de orientador nas horas necessárias.

Agradeço aos meus companheiros do LAAICA Caroline Amorim, Thomas Jefferson, Júlio Hermann e Eriberto Oliveira por todo acompanhamento e esclarecimentos nesse período.

Por fim, simplesmente agradeço ao Cosmos por me dar forças e persistência para vencer em momentos nos quais minha saúde me fazia questionar minha força de vontade.

**One's mind, once stretched by a new idea,  
never regains its original dimensions.**

*Oliver Wendell Holmes Jr.*

## RESUMO

Ruído ambiental é uma forma de poluição atmosférica gerada através do aumento da vibração no ar oriunda de diversas fontes simultâneas, porém, possui parcela significativa principalmente do ruído rodoviário, ferroviário e aeroviário. O ruído aeroviário é constituído de elevados níveis de pressão sonora e propaga-se por uma grande área, afetando de maneira negativa a saúde e o bem estar da população que vive no entorno de aeroportos. Como toda forma de poluição, o ruído aeroviário deve ser gerenciado, identificando-se as fontes e receptores expostos a essa poluição e prevendo-se medidas de redução e controle. Na cidade de Curitiba, há a lei municipal 10.625/2002 que regulamenta o limite de pressão sonora por zoneamento urbano. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade acústica do entorno do Aeroporto Bacacheri, em Curitiba/PR. O trabalho utiliza como metodologia a coleta de dados do tráfego aéreo de 2018, medição dos níveis de pressão sonora próximos a pista do aeroporto, análise das componentes tonais do ruído aeroviário, o mapeamento acústico da região e a proposição de medidas mitigatórias. As medições dos níveis de pressão sonora seguiram as recomendações da NBR 10.151/19, ISO 3891 e NBR 13.368/95. Foram realizadas 6 medições em pontos próximos a pista do aeroporto, a fim de identificar o efeito do ruído aeroviário sem a influência de demais fontes sonoras, bem como validar a simulação acústica que gerou os mapas de ruído. Nos 6 pontos medidos, 5 pontos estão acima do permitido pela legislação municipal, 60 dB(A), entretanto, a lei se torna mais rígida na presença de hospitais e escolas, restringindo o limite para 55 dB(A). Com o mapeamento acústico, foi possível identificar os pontos críticos atingidos pelo ruído aeroviário e a área total contemplada pela poluição sonora. Após identificar os pontos expostos a poluição sonora, simulou-se cenários de controle e redução do ruído. Por fim, conclui-se que o ruído aeroviário é um ruído de difícil controle devido à potência utilizada pelas aeronaves para alçar voo, influenciando extensas áreas e que a maneira ideal de se controlar o ruído gerado em aeroportos são as aplicações simultâneas de diversas ferramentas de gestão pelo poder público e pela administradora do aeroporto.

Palavras chave: Ruído Aeroviário. Mapeamento Acústico. Gestão de Ruído. Ruído Ambiental.

## **ABSTRACT**

Environmental noise is a form of air pollution generated by increasing air vibration from several simultaneous sources, but it has a significant portion mainly of road, rail and aircraft noise. Aircraft noise is made up of high levels of sound pressure and spreads over a large area, negatively affecting the health and well-being of the population living around airports. Like all forms of pollution, aircraft noise must be managed by identifying the sources and receivers exposed to this pollution and providing for reduction and control measures. In the city of Curitiba, there is the municipal law 10.625/2002 that regulates the sound pressure limit by urban zoning. The present work aims to evaluate the acoustic quality around Bacacheri Airport, in Curitiba/PR. The work uses as methodology the data collection of air traffic of 2018, measurement of sound pressure levels near the airport runway, analysis of tonal components of aircraft noise, acoustic mapping of the region and the proposition of mitigation measures. The sound pressure level measurements followed the recommendations of NBR 10.151/19, ISO 3891 and NBR 13.368/95. Six measurements were made at points near the airport runway in order to identify the effect of aircraft noise without the influence of other sound sources, as well as validate the acoustic simulation that generated the noise maps. In the 6 points measured, 5 points are above the municipal law's limit, 60 dB (A), however, the law becomes stricter in the presence of hospitals and schools, restricting the limit to 55 dB (A). With the acoustic mapping, it was possible to identify the critical points reached by aircraft noise, the total area and the population covered by noise pollution. After identifying the points exposed to noise pollution, were simulated control scenarios and noise reduction. Finally, it is concluded that aircraft noise is a noise that is difficult to control due to the power used by aircraft to take flight, influencing large areas and that the ideal way to control airport noise is the simultaneous application of various aircraft tools management by the government and the airport administrator.

**Keywords:** Aircraft noise. Acoustic mapping. Noise management. Environmental noise.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TIPOS DE RÚIDO: A) CONTÍNUO; B) INTERMITENTE E C) IMPULSIVO .....	24
FIGURA 2: RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO SONORA (Pa) E O NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (dB).....	26
FIGURA 3: RELAÇÃO DE RESPOSTA ENTRE AS CURVAS DE PONDERAÇÃO A, B E C.....	27
FIGURA 4: RÚIDO AERODINÂMICO: REALÇADOS EM AZUL REPRESENTAM O RÚIDO AERODINÂMICO NA FUSELAGEM DO AVIÃO E EM VERMELHO O RÚIDO DE PROPULSÃO .....	30
FIGURA 5: COMPONENTES MECÂNICOS GERADORES DE RÚIDO NO SISTEMA DE PROPULSÃO A JATO.....	31
FIGURA 6: PROGRESSO ACUMULADO DA REDUÇÃO DE RÚIDO NA FONTE ATRAVÉS DE CERTIFICAÇÃO. ....	34
FIGURA 7: NÚMERO DE AEROPORTOS QUE IMPLEMENTARAM MEDIDAS PARA CONTROLE DE RÚIDO COM O PASSAR DOS ANOS.....	36
FIGURA 8: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS PARA SITUAÇÃO FICTÍCIA NO AEROPORTO BACACHERI.....	38
FIGURA 9: FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO MODELO ECAC CEAC DOC. 29.42	
FIGURA 10: CURVAS ISOFÔNICAS NO AEROPORTO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS PELO MODELO INM. ....	47
FIGURA 11: RESULTADO DO QUESTIONÁRIO RELACIONADO AO INCÔMODO CAUSADO POR RÚIDO AEROVIÁRIO. ....	47
FIGURA 12: CURVA ISOFÔNICA SIMULADA NO INM PARA NÚMERO TOTAL DE VOOS.....	49
FIGURA 13: PONTOS E RESULTADOS DE MEDIÇÃO NO ENTORNO DO AEROPORTO DE LARNAKA.....	50
FIGURA 14: SIMULAÇÃO REALIZADA PARA O AEROPORTO DE LARNAKA. ....	51
FIGURA 15: INFLUÊNCIA DOS RÚIDOS AERO E RODOVIÁRIO NAS ATIVIDADES COTIDIANAS. ....	52
FIGURA 16: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS NO SOFTWARE INM PARA O AEROPORTO INTERNACIONAL VIRACOPOS. ....	53



FIGURA 17: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS NO SOFTWARE INM PARA O LAEQ DIURNO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE PISA .....	54
FIGURA 18: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DE LONGO E CURTO TEMPO.....	55
FIGURA 19: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE INSTAMBUL ATATURK PELO SOUNDPLAN 7.1 .....	56
FIGURA 20: RESULTADOS CALCULADOS E MEDIDOS NAS ESTAÇÕES DE CURTO TEMPO DE MONITORAMENTO.....	57
FIGURA 21: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO ANKARA ENSEBOGA PARA A SITUAÇÃO ATUAL DE TRÁFEGO AÉREO.....	58
FIGURA 22: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO ANKARA ENSEBOGA PARA A SITUAÇÃO FUTURA EM 2020, 2025 E 2030 NO PIOR CENÁRIO AMBIENTAL POSSÍVEL, PARA 55 DB(A). ....	59
FIGURA 23: MAPEAMENTO DE RUÍDO PARA <i>LDEN</i> , <i>LDAY</i> , <i>LEVENINGE</i> <i>LNIGHT</i> NO AEROPORTO IZMIR ADNAN MENDERES.....	61
FIGURA 24: MEDIÇÃO DE LAEQ PRÓXIMO AO AEROPORTO BACACHERI .....	63
FIGURA 25: ZONEAMENTO URBANO AO REDOR DO AEROPORTO BACACHERI CONFORME LEI MUNICIPAL 9800/2000.....	66
FIGURA 26: FLUXO AÉREO POR MODELO DE AERONAVES NO AEROPORTO – PARTE 1 .....	69
FIGURA 27: FLUXO ÁÉREO POR MODELO DE AERONAVES NO AEROPORTO – PARTE 2 .....	70
FIGURA 28: DISTRIBUIÇÃO DO TOTAL DE OPERAÇÕES POR TIPO DE MOTOR .....	70
FIGURA 29: DISTRIBUIÇÃO DAS OPERAÇÕES POR HORÁRIO .....	71
FIGURA 30: DISTRIBUIÇÃO DAS OPERAÇÕES POR HORÁRIO .....	72
FIGURA 31: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO AO REDOR DA PISTA DE OPERAÇÕES DO AEROPORTO BACACHERI COM DEMARCAÇÃO DA ZONA DE SILÊNCIO.....	73
FIGURA 32: PLANILHA PARA COLETA DOS DADOS MEDIDOS. ....	74
FIGURA 33: MEDIÇÃO DE LAeq PRÓXIMO A CABECEIRA 18 – PONTO 1 - ARROWJET .....	75
FIGURA 34: MEDIÇÃO DE LAeq NO TERMINAL AEROPORTO – PONTO 2.....	75

FIGURA 35: MEDIÇÃO DE LAeq PRÓXIMO A CABECEIRA 36 DA PISTA - PONTO 3 .....	76
FIGURA 36: MEDIÇÃO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA NO PONTO 3 – COM AERONAVE BIMOTORA .....	77
FIGURA 37: MEDIÇÃO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA NO PONTO 3 – COM AERONAVE MONOMOTORA.....	77
FIGURA 38: SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO MAPEAMENTO ACÚSTICO NO SOUNDPLAN.....	79
FIGURA 39: MODELO DIGITALIZADO DO AEROPORTO BACACHERI NO <i>SOUNDPLAN 8.0</i> .....	80
FIGURA 40: VISTA DA ÁREA DO AEROPORTO BACACHERI EM 3D NO <i>SOUNDPLAN 8.0</i> .....	81
FIGURA 41: REGISTRO DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 1.....	83
FIGURA 42: <i>DATALOGGER</i> DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 2.....	84
FIGURA 43: <i>DATALOGGER</i> DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 3.a.....	85
FIGURA 44: <i>DATALOGGER</i> DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 3.b.....	86
FIGURA 45: <i>DATALOGGER</i> DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 4.....	87
FIGURA 46: <i>DATALOGGER</i> DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 5.....	87
FIGURA 47:COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS COM A LEGISLAÇÃO E NORMAS.....	89
FIGURA 48: ESPECTRTO DE FREQUÊNCIA OBTIDA PELO ANALISADOR SONORO B&K 2270 .....	90
FIGURA 49: ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DOS DOIS ANALISADORES SONOROS COMPARADOS COM A LEGISLAÇÃO. ....	91
FIGURA 50: MAPA DE RUÍDO AEROVIÁRIO DO AEROPORTO BACACHERI – SITUAÇÃO ATUAL ATÉ 55 dB(A) .....	94

FIGURA 51: VISTA 3D DO MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI. ....	95
FIGURA 52: MAPA DE RUÍDO AEROVIÁRIO DO AEROPORTO BACACHERI – SITUAÇÃO ATUAL COM RAIOS DE 200 M DA ZONA DE SILÊNCIO .....	96
FIGURA 53: MAPA DE RUÍDO – MEDIDA MITIGADORA: REMOÇÃO DE AERONAVES A JATO E BIMOTORAS.....	102
FIGURA 54: MAPAS DE RUÍDO DAS MEDIDAS MITIGADORAS: A) REDUÇÃO DE 20 % DO TRÁFEGO; B) REDUÇÃO DE 50 % DO TRÁFEGO E C) REDUÇÃO DE 70 % DO TRÁFEGO. ....	106

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: EXEMPLO PRÁTICO DA PONDERAÇÃO DE PRESSÃO SONORA PARA CURVA A.....	28
TABELA 2: EXEMPLOS DE RESTRIÇÕES OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DE RUÍDO.....	36
TABELA 3: LIMITES DE RUÍDO CONFORME ZONEAMENTO URBANO E PERÍODO DIÁRIO NA CIDADE DE CURITIBA. ....	43
TABELA 4: NÍVEL DE CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO PARA AMBIENTES EXTERNOS EM DB(A). ....	44
TABELA 5: NÍVEL DE CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO PARA AMBIENTES EXTERNOS EM DB(A). ....	45
TABELA 6: AVALIAÇÃO DE INCÔMODO GERADO PELA OPERAÇÃO DE AERONAVES.....	45
TABELA 7: RESULTADO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO SONORA EQUIVALENTE. ....	48
TABELA 8: NÚMERO DE ENTREVISTADOS QUE CONSIDERAM IMPACTANTE O RUÍDO AEROVIÁRIO E RODOVIÁRIO POR ZONAS. ....	52
TABELA 9: VALORES DE PRESSÃO SONORA OBTIDOS NO MONITORAMENTO. ....	52
TABELA 10: ESTIMATIVA DOS RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA.....	53
TABELA 11: NÚMERO DE VOÔS PARA OS CENÁRIOS PROPOSTOS NO MAPEAMENTO ACÚSTICO. ....	57
TABELA 12: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: ÁREA E NÚMERO DE HABITANTES AFETADOS PELO RUÍDO NO AEROPORTO ANKARA ENSENBGA. ....	58
TABELA 13: ESTIMATIVA DA ÁREA ACUMULADA E POPULAÇÃO AFETADA PARA O CENÁRIO FUTURO DE PIOR SITUAÇÃO AMBIENTAL POSSÍVEL.....	59
TABELA 14: ESTIMATIVA DA ÁREA ACUMULADA E POPULAÇÃO AFETADA CONFORME O MAPEAMENTO ACÚSTICO NO AEROPORTO IZMIR ADNAN MENDERES. ....	62
TABELA 15: RESUMO GERAL DAS METODOLOGIAS APLICADAS PARA AVALIAÇÃO DE RUÍDO AEROVIÁRIO. ....	64

TABELA 16: LIMITES DE RUÍDO CONFORME ZONEAMENTO AO REDOR DO AEROPORTO BACACHERI.....	67
TABELA 17: MODELOS DE AERONAVES OPERANTES IDENTIFICADOS NO RELATÓRIO ANUAL, COM SEUS RESPECTIVOS CÓDIGOS E CLASSIFICAÇÕES POR EMISSÃO DE RUÍDO.....	68
TABELA 18: COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS COM A LEGISLAÇÃO EM DB(A). ....	88
TABELA 19: VALORES GLOBAIS DE LAEQ, LAMAX E LAMIN OBTIDOS NA MEDIÇÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA. ....	90
TABELA 20: DIFERENÇA DOS VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DE CAMPO COM OS VALORES SIMULADOS NO MODELO .....	93
TABELA 21: QUANTIFICAÇÃO DOS RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA DO AEROPORTO BACACHERI ATÉ 55 DB (A). ....	97
TABELA 22: SITUAÇÃO ATUAL DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO MUNICIPAL DE RUÍDO PARA ZONAS RESIDENCIAIS 1.....	98
TABELA 23: SITUAÇÃO ATUAL DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA NBR 10.151/19...99	
TABELA 24: QUANTIFICAÇÃO DOS RECEPTORES AFETADOS PELO RUÍDO COM A MEDIDA MITIGATÓRIA DE REMOÇÃO DAS AERONAVES A JATO E BIMOTORAS.....	103
TABELA 25: COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE LAEQ NOS PONTOS CRÍTICOS COM A MEDIDA DO CENÁRIO 1, EM DB(A). ....	103
TABELA 26: CENÁRIO 1 DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA NBR 10.151/19. VALORES EM DB(A). ....	104
TABELA 27: QUANTIFICAÇÃO DE RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA APÓS REDUÇÃO DE FLUXO DAS AERONAVES CERTIFICADAS .....	107
TABELA 28: COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE LAEQ NOS PONTOS CRÍTICOS COM AS MEDIDAS DO CENÁRIO 2, EM DB(A). ....	108
TABELA 29: AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS MEDIDAS MITIGATÓRIAS. ....	109



## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

LAeq – Nível de pressão sonora equivalente

LAmáx – Nível de pressão sonora máximo

LAmin – Nível de pressão sonora mínimo

DNL – *Day Night Level Pressure*

Lden – *Level pressure day-evening-night*

Ln – *Night level pressure*

Ld – *Day level pressure*

Levening – *Evening level pressure*

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ISO – *International Organization for Standardization*

NNC – *Non noise certified*

ECAC – *European Civil Aviation Conference*

ICAO – *Institute of Civil Aviation Organization*

INM – *Integrated Noise Model*

ZE – M – Zona especial militar

ZR – 1 – Zona residencial 1

AT – Valores simulados para situação atual

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	18
2.	JUSTIFICATIVA .....	20
3.	OBJETIVOS .....	22
3.1	Objetivo geral .....	22
3.2	Objetivos específicos.....	22
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	23
4.1.	Som e Ruído.....	23
4.2.	Métricas e parâmetros acústicos para ruído ambiental .....	25
4.2.1	Pressão e Nível de pressão sonora.....	25
4.2.2	Curva de Ponderação em filtro A.....	26
4.2.3	Nível de Pressão Sonora equivalente em filtro A .....	28
4.2.4	Nível de pressão sonora periódico .....	29
4.3.	Ruído aeroviário .....	30
4.3.1	Ruído aerodinâmico .....	30
4.3.2	Ruído de propulsão .....	31
4.4	Mitigação e controle de ruído aeroviário.....	32
4.5	Curvas isofônicas .....	37
4.6	Mapeamento acústico .....	38
4.7	Modelo ECAC CEAC doc. 29/1997 .....	39
4.8	Legislação e normas para ruído aeroviário .....	42
4.8.1	Lei Municipal de Curitiba nº 10.625/2002 - .....	42
4.8.2	ABNT NBR 10151/19 - Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral.....	43
4.8.3	ISO 3891 - <i>Acoustics -- Procedure for describing aircraft noise heard on the ground</i> .....	44
4.8.4	ABNT NBR 13.368/1995 – Ruído gerado por aeronaves – monitoração – método de ensaio.....	45
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	46
5.1.	Ruído aeronáutico .....	46

6.	METODOLOGIA.....	65
6.1	Coleta de dados .....	65
6.1.1	Aeroporto Bacacheri.....	65
6.1.2	Quantificação do tráfego aéreo .....	67
6.1.3	Modelos de aeronaves e tráfego aéreo .....	67
6.1.4	Definição dos pontos de medição .....	72
6.1.5	Medição dos Níveis de Pressão Sonora, <i>data logger</i> e análise de frequência..	74
6.2	Mapeamentos acústicos.....	78
6.3	Validação do modelo.....	82
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
7.1	Medições dos Níveis de Pressão Sonora.....	83
7.2	Análise do Espectro de Frequência.....	90
7.3	Simulações acústicas .....	92
7.3.1	Validação do Modelo .....	92
7.3.2	Mapeamento acústico – Situação atual.....	93
7.3.3	Medidas Mitigatórias.....	100
7.3.3.1	Cenário 1 – Restrições operacionais.....	101
7.3.3.2	Cenário 2 – Redução de ruído na fonte.....	104
8.	CONCLUSÕES .....	110
	REFERÊNCIAS.....	112
	APÊNDICE A – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 20 % DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS .....	117
	APÊNDICE B – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 50 % DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS .....	118
	APÊNDICE C – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 70 % DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS .....	119

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o transporte aéreo é um dos eixos estruturais triviais para o desenvolvimento econômico de cidades, estados e até no âmbito nacional (ALONSO et al., 2017). Com o aumento tecnológico e a globalização, a demanda pelo uso do transporte aéreo, tanto para fins comerciais como para turismo, aumentou consideravelmente, sendo necessário que os aeroportos se expandam e aumentem o fluxo de aeronaves para atender essa demanda (MORAIS, 2008). De acordo com *Airbus Global Market Forecast* (2018) estima-se uma demanda de 37.400 aeronaves adicionais no tráfego aéreo até o ano de 2037, sendo necessário um investimento de US\$ 5,8 trilhões.

Entretanto, a operacionalização de aeroportos apresenta conflitos na sociedade. Na mesma medida que auxilia no desenvolvimento econômico local, regional e nacional, a expansão e o aumento do tráfego aéreo geram impactos ambientais negativos para as comunidades anexas, como o aumento da emissão de ruído pela operação de aeronaves, apoio no solo – como manobras de aeronaves, reboque e deslocamento para o ponto de decolagem - e fluxo de automóveis próximos a aeroportos, causando irritação, desconforto e danos à saúde aos moradores (NUNES, 2005; MORAIS, 2008; TANDON, 2003). Além disso, Espey e Lopez (2002) verificaram a desvalorização financeira de imóveis próximos a aeroportos de grande escala.

O ruído ambiental é a poluição sonora presente no ambiente, originada de diversas fontes simultâneas, como o fluxo de automóveis, a atividade ferroviária e aeroportuária, atividades de construção civil, atividades industriais e demais fontes de poluição sonora no ambiente, com exceção do ruído ocupacional (EUROPEAN COMMISSION, 2017; ZANNIN E BUNN, 2014; ZANNIN et al, 2002; ABNT, 1990).

A Organização Mundial da Saúde (2011) identificou a exposição ao ruído como o segundo maior fator desencadeador de doenças, ficando atrás apenas da poluição do ar. Os impactos na saúde causados pela exposição ao ruído ambiental são: distúrbios no sono, doenças cardiovasculares, problemas e danos no sistema auditivo, danos no sistema psicológico, como aborrecimento, estresse, redução de

desempenho acadêmico escolar e profissional, e alterações comportamentais (SANTÉ, 2016).

O ruído aeronáutico é originado principalmente no solo, no processo de decolagem e de aterrissagem das aeronaves e no movimento da aeronave na atmosfera. Anteriormente, o ruído aeroviário não era tratado como um grande problema ambiental e de saúde pública que como o é atualmente. A preocupação com o ruído aeroviário ganhou foco a partir da inserção das aeronaves movidas por propulsores a jatos em substituição às aeronaves com sistemas de propulsão por motores, visto que o ruído gerado por elas aumentou consideravelmente. Em função desse aumento de tráfego e de potência das aeronaves, o ruído tornou-se uma poluição a ser gerenciada.

Ao identificar o ruído excessivo como um problema de saúde pública, o *Institute of Civil Aviation Organization* (ICAO) estabeleceu políticas e programas de redução de ruído em aeroportos, através de restrições e melhorias em operações no solo, bem como limitações legais para aeronaves com maior emissão de ruído. Aliado a isto, alguns aeroportos, como o de Manchester e de Heathrow, adotam estratégias e programas internos de monitoramento contínuo de ruído para análise da eficiência das medidas de controle de ruído adotadas, medições dos níveis de pressão sonora e a utilização de mapas de ruído simulados.

A elaboração de mapas de ruídos, ou mapeamento acústico, baseia-se na execução sequencial de algoritmos computacionais com o objetivo de calcular a propagação do som em ambientes abertos através de métodos matemáticos (ZANNIN, 2019; KANG, 2007). O objetivo da simulação computacional é conseguir a melhor aproximação possível entre os dados medidos e os calculados. Ao término de cada simulação, é possível diagnosticar, qualquer ambiente de interesse como no caso do entorno de aeroportos. Além disso, com a utilização de mapas acústicos é possível criar mapas hipotéticos de cenários futuros de ruído ambiental que podem e devem ser utilizados como ferramenta auxiliar na gestão e controle de ruídos bem como na tomada de decisões da gestão pública.

Diante do exposto acima, este projeto tem como proposta verificar a existência de ruído ambiental excessivo na comunidade local gerado pela atividade aeronáutica no Aeroporto Bacacheri em Curitiba.



## 2. JUSTIFICATIVA

Um dos principais componentes do ruído ambiental é o ruído oriundo do fluxo de aeronaves, ocasionando impactos negativos à saúde, bem estar e qualidade de vida da população que reside em seu entorno, como dores de cabeça, insônia, estresse, sintomas de irritação, redução do desempenho profissional e efeitos secundários no comportamento social.

A avaliação acústica do ruído ambiental é um procedimento que demanda tempo, recurso tecnológico, computacional e conhecimento técnico. Contempla a aplicação de normas e padrões técnicos para medições de parâmetros acústicos, interpretação destes com critérios e valores permitidos por leis, mapeamento acústico das áreas atingidas por modelos computacionais, validação do modelo através da análise entre valores reais e simulados, e, além disso, possibilita a criação de propostas de ações corretivas e/ou compensatórias.

No continente europeu, principalmente nos países membros da União Europeia, o mapeamento de ruído aeroviário é uma exigência legal aos aeroportos com mais de 50.000 movimentos por ano, conforme a diretiva 49, sendo necessário uma atualização a cada 5 anos dos respectivos mapas, bem como planos de ações para gestão do ruído (EUROPEAN COMMISSION, 2002).

No Brasil, a gestão do ruído ambiental baseia-se principalmente na imposição de limites máximos de ruído permitido, com restrições em horários do dia e zonas da cidade conforme uso e ocupação do solo. Essa metodologia de controle implica apenas na identificação e punição das fontes geradoras, quando denunciadas por um receptor, não priorizando a avaliação completa da poluição, que consiste na identificação da fonte geradora, do tipo da fonte, da área total atingida pelos valores extrapolados e a exigência de ações corretivas de redução de ruído.

Para realizar a gestão adequada do ruído ambiental, é necessário priorizar a identificação de zonas de *hot spot* - zonas quentes - que indicam o grau de criticidade da situação em questão, permitindo à administração pública definir políticas, instrumentos e metas necessárias para redução da poluição e consequente melhoria da qualidade ambiental da área e da população atingida.

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) regulamenta a criação de planos de zoneamento de ruído para todos os aeroportos (ANAC, 2013). No

entanto, os planos não contemplam medidas de correções para o controle do ruído, apenas a identificação da área afetada.

Zannin et al (2016) realizaram uma pesquisa a fim de avaliar o nível de incômodo causado pelo ruído aeroviário no Aeroporto Bacacheri, em Curitiba, através de entrevistas com a comunidade no entorno do Aeroporto. O resultado do questionário indicou que 36 % dos entrevistados relataram ter dores de cabeça em função da presença de ruído gerado pelas aeronaves e ainda 35% relataram alteração de humor e sinais de irritabilidade, evidenciando a necessidade de um estudo detalhado da qualidade acústica do local e a implementação de instrumentos de mitigação da poluição sonora.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O presente projeto tem como objetivo realizar uma avaliação acústica no entorno do aeroporto Bacacheri, localizado no bairro Bacacheri em Curitiba, Paraná. Para isso realizaram-se medições dos níveis de pressão sonora em pontos no entorno da pista do aeroporto e o mapeamento acústico da área de circunvizinhança em função do ruído gerado na pista de operações. São propostos cenários de redução de ruído através de simulação computacional.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Construção de uma metodologia científica na qual permite a completa avaliação do ruído aeroviário com os seguintes objetivos específicos:

- I) Quantificar o tráfego aéreo envolvendo a identificação das aeronaves que operam no aeroporto;
- II) Medir os seguintes parâmetros acústicos de maneira padronizada por normas:
  - Nível de Pressão Sonora Equivalente (LAeq);
  - Nível de Pressão Sonora Máxima (LAmáx);
  - Nível de Pressão Sonora Equivalente e Máximo (LAeq e LAmáx) por componente tonal do ruído aeroviário na banda de 1/3 de oitava;
- III) Simular no software SoundPlan 8.0 a propagação do ruído aeroviário no Aeroporto Bacacheri;
- IV) Avaliar a condição acústica da área com os critérios legais;
- V) Propor medidas de mitigação;

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Som e Ruído

Som pode ser definido como qualquer vibração ou perturbação de um sistema mecânico, causado por variações de pressão, que se propaga em um meio elástico, sólido ou viscoso, líquido e gasoso, desde que esta vibração ou perturbação cause sensações auditivas ao ser humano (ABNT, 1990; DE MARCO, 1982; FERNANDES, 2002). Entretanto, Bistafa (2006) classifica também como som as ondas infrassônicas, para frequências menores que 20 Hz, e as ondas ultrassônicas, para frequências acima de 20.000 Hz, apesar de não serem perceptíveis ao ouvido humano, porém, podendo ser perceptíveis diferentes espécies de animais.

Quando a onda vibrante se propaga no meio, ocorre a vibração das moléculas, aumentando sua velocidade de oscilação, e, conseqüentemente, aumenta a quantidade de movimento das moléculas, gerando um maior índice de colisões entre elas, que, por fim, transfere-se a energia vibracional para a molécula vizinha (NETO, 2010; GERGES, 2000). Neto (2010) explica que qualquer fenômeno natural ou artificial que altere ou crie ondas de pressão no ar - som - pode ser classificado como fonte sonora.

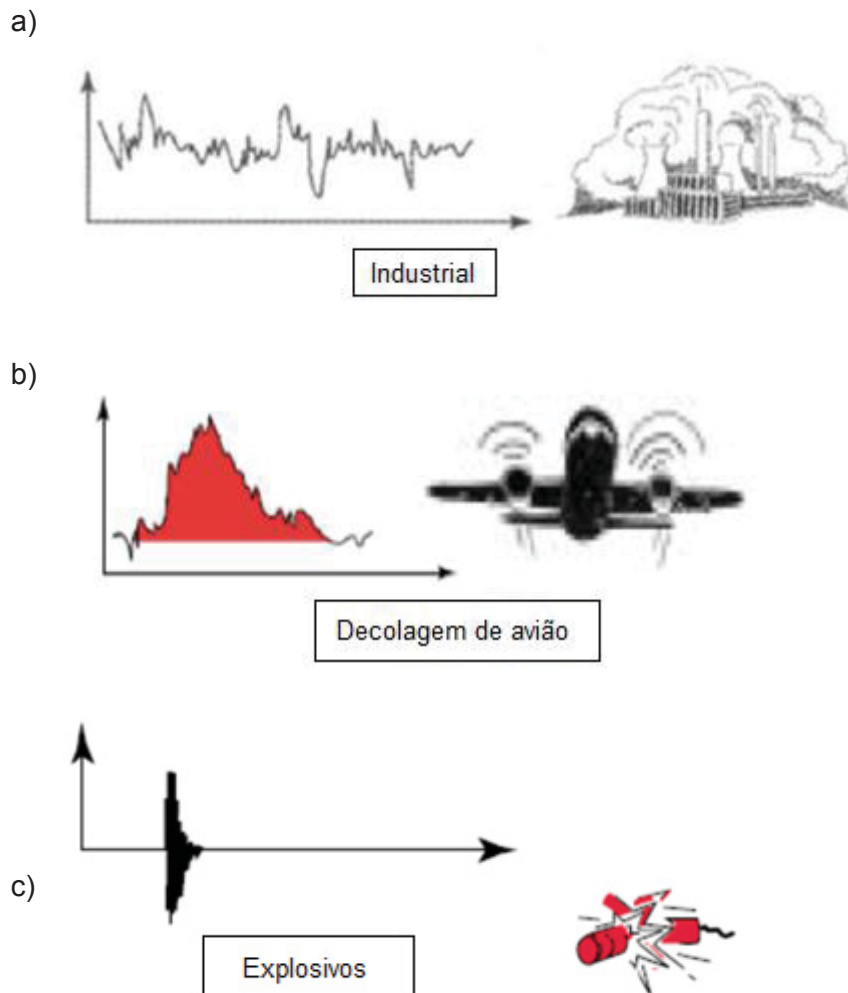
Quando uma fonte sonora emite sons desconfortáveis, com elevados valores de pressão sonora ou emite sons relativamente elevados por um período prolongado, tem-se o ruído. Ruído é um som indesejável e perturbador, geralmente oriundo de alguma atividade antrópica e com diversos malefícios a saúde quando a exposição é prolongada (HASSAL e ZAVERI, 1979; BISTAFA, 2006).

Entretanto, a diferença entre ruído e som é variada conforme a sensibilidade auditiva de cada sujeito visto que ambos contemplam o mesmo princípio físico. A percepção ao ruído é condicionante a diversos fatores como contexto social e local, condição de saúde individual e saúde mental. Nunes (2005) classifica o ruído em três comportamentos: contínuo, intermitente e impulsivo.

O ruído contínuo é o ruído analisado por um determinado tempo, que não apresente variação acima de 6 dB, sendo geralmente associado a atividades ininterruptas de máquinas. O ruído intermitente é caracterizado por apresentar comportamento cíclico, como a passagem de um avião ou de um automóvel, devendo apresentar mais de 6 dB nos intervalos medidos. O ruído impulsivo é

associado a picos instantâneos menores que 1 segundo, com alta energia acústica, geralmente associada a explosões, acidentes de carro e foguetes (NUNES, 2005; ABNT, 1990). Os tipos de ruído podem ser observados na Figura 1:

FIGURA 1: TIPOS DE RÚIDO: A) CONTÍNUO; B) INTERMITENTE E C) IMPULSIVO



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjaer (2001).

Como citado na introdução, o ruído ambiental é um ruído no ambiente gerado por diversas fontes simultâneas, sendo considerado um ruído de complexo entendimento e análise devido à participação simultânea de várias fontes de diversas atividades antrópicas, o que dificulta a identificação isolada de fontes poluidoras (ZANNIN et al., 2002).



## 4.2. Métricas e parâmetros acústicos para ruído ambiental

Nesta seção abordam-se os parâmetros e indicadores utilizados para quantificação do ruído ambiental.

### 4.2.1 Pressão e Nível de pressão sonora

A sensibilidade humana ao ruído e a sensação de incômodo é alterada por diversos fatores, como o horário de ocorrência, a duração, o tipo de ruído, espectro de frequência, condições meteorológicas, distância do receptor para a fonte e é afetado, também, por fatores pessoais e psicológicos do receptor (ZANNIN, 2005). Para avaliar o ruído em um ambiente, utilizam-se métricas acústicas a fim de associar o grau de incômodo e a aceitabilidade entre o ruído e as atividades cotidianas (LONG, 2006).

O ruído ambiental pode ser quantificado através do conceito de pressão sonora. Pressão sonora é a variação da pressão do ar, relativo à pressão atmosférica causada pela vibração das partículas atmosféricas em função de uma ou mais fontes sonoras (GERGES, 2000; BISTAFÁ 2006).

O nível de pressão sonora (NPS) no ar pode ser descrito pela equação 1:

$$NPS = 10 \cdot \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (1)$$

Sendo:

NPS: nível de pressão sonora, em decibéis (dB);

p: pressão sonora no ponto medido, em Pascal (Pa) ou N/m<sup>2</sup> ;

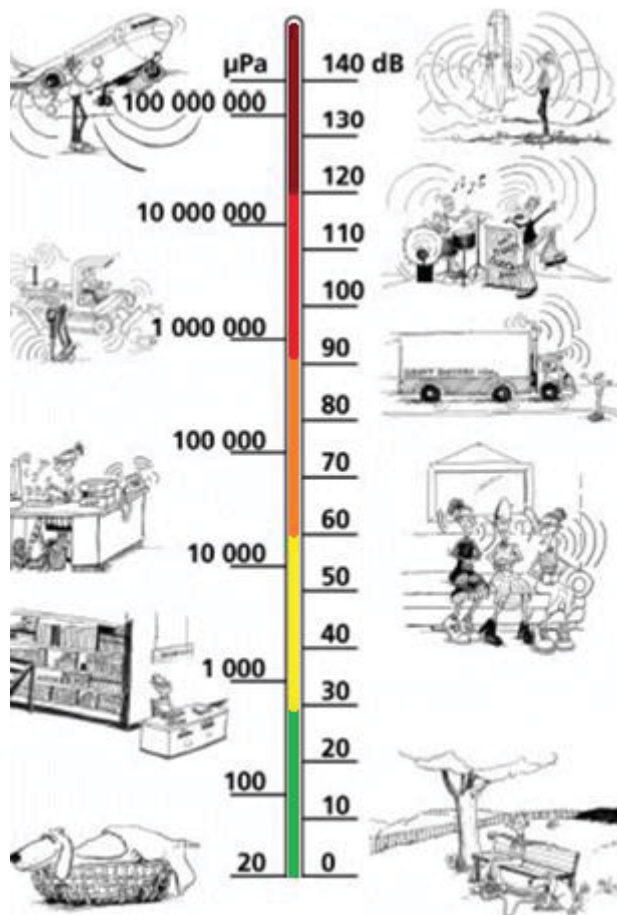
p<sub>0</sub>: pressão sonora de referência, em Pa ou N/m<sup>2</sup>.

Usualmente, o valor da pressão sonora de referência é equivalente a 2x10<sup>-5</sup> Pa ou 20 µPa, por ser o menor valor de audibilidade humana, ou, limiar de audibilidade. Na outra extremidade, identifica-se o limiar da dor com pressões sonoras acima de 200 Pa (GERGES, 2000; BISTAFÁ 2006; SCHULTZ, 1972). A audição humana não se comporta de forma linear aos estímulos vibracionais no ar, mas sim de forma logarítmica (FIEDLER, 2013). A unidade do NPS é em dB, pois corresponde a uma escala logarítmica em relação a um valor de referência

internacional, iniciando do limiar da audibilidade humana, 0 dB ou 20  $\mu\text{Pa}$ , até o limiar da dor, 130 dB ou 100 Pa. O decibel é uma escala adimensional na qual compara o quanto um valor é maior em relação a um valor de referência.

A utilização do nível pressão sonora, em dB, facilita visualização da quantificação do nível de pressão sonora através da conversão dos valores de pressão em Pascal para valores gerenciáveis entre 0 dB a 130 dB (BRUEL & KJAER, 2000). A relação entre a unidade de pressão em Pa e o NPS pode ser vista na Figura 2:

FIGURA 2: RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO SONORA (Pa) E O NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (dB)



FONTE: Adaptado de Brüel & Kjaer (2001).

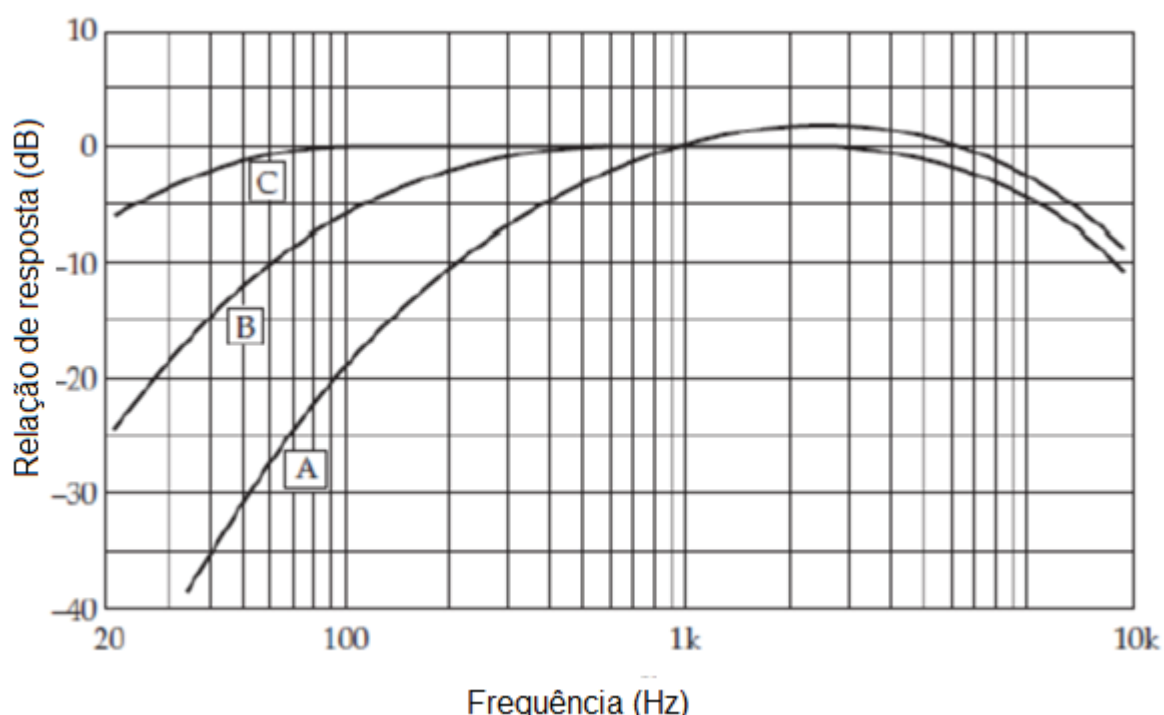
#### 4.2.2 Curva de Ponderação em filtro A

O ouvido humano não reage de maneira homogênea a todos os estímulos sonoros, tendendo ser mais sensível a frequências mais baixas e menos sensível as altas frequências (MURPHY & KING, 2014). Em função da sensibilidade auditiva humana, os equipamentos utilizados para medir sons são modelados de maneira a

corrigir o nível de pressão sonora em frequências distintas e intensidades iguais que mais se associam ao ouvido humano.

As correções nas pressões sonoras medidas nos equipamentos consistem na aplicação de filtros eletrônicos de sensibilidade variável em relação à frequência, denominados de filtros A, B, C e D, sendo o filtro A utilizado para correlação a audição humana (DINATO, 2011; EVEREST & POHLMANN, 2009; GERGES, 2000). As unidades de pressão sonora utilizadas para cada filtro são: dB(A), dB(B), dB(C) e dB(D). As curvas de ponderação entre os filtros A, B e C podem ser vistas na Figura 3:

FIGURA 3: RELAÇÃO DE RESPOSTA ENTRE AS CURVAS DE PONDERAÇÃO A, B E C.



FONTE: Adaptado de Everest & Pohlmann (2001)

A tabela 1 apresenta um exemplo prático de correção nos valores de pressão sonora medidos em dB e os valores corrigidos para o filtro ponderado em A para as frequências centrais de 1/3 de oitava banda entre 63 Hertz (Hz) e 8000 Hz:

TABELA 1: EXEMPLO PRÁTICO DA PONDERAÇÃO DE PRESSÃO SONORA PARA CURVA A.

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pressão sonora linear (dB)	55,5	51,8	48,7	45,3	39,1	35,4	30,4	25,7
Ponderação em A (dB)	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1
Pressão sonora ponderada em A (dB(A))	29,3	35,7	40,1	42,1	39,1	36,6	31,4	24,6

Fonte: O autor (2018).

#### 4.2.3 Nível de Pressão Sonora equivalente em filtro A

Um dos parâmetros mais utilizados para avaliação do incômodo causado por ruído é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A (LAeq). O nível de pressão sonora equivalente total é a soma logarítmica dos níveis sonoros de um ambiente de diversas fontes durante um determinado tempo. Conforme Schultz (1972), a equação da pressão sonora equivalente é dada pela equação 2:

$$LAeq = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \left( \frac{p(t^2)}{p_o^2} \right) \cdot dt \right) \quad (2)$$

Onde:

LAeq: nível de pressão sonora equivalente ponderada em A, em dB(A);

T: período de duração da medição, em s;

P(t): pressão sonora instantânea medida no tempo t, em dB(A);

Po: pressão sonora de referência, igual a  $2 \times 10^{-5}$  Pa ou 20 µPa.

De acordo com Bistafa (2006), o parâmetro LAeq apresenta problemas na interpretação e análise de medições de ruído de comportamento impulsivo por reduzir o valor medido em função dos ruídos de fundo, geralmente, menores que os picos impulsivos, para isso, o ruído analisado deve ter, no mínimo, diferença de 3 dB a mais que o ruído de fundo.

#### 4.2.4 Nível de pressão sonora periódico

Outro parâmetro amplamente utilizado no âmbito global é o Nível de Pressão sonora dia-noite (*Day-Night Level* – Ldn ou DNL). O Ldn é semelhante ao LAeq, entretanto, ele divide o período de medição de 24 horas em diurno, das 7h às 22h, e em noturno, das 22h às 7h, com um acréscimo de 10 dB para os níveis medidos no período noturno, devido à evidente redução no ruído de fundo (REYNOLDS, 1981). Conforme Long (2006) a equação do parâmetro Ldn pode ser observado na equação 3:

$$LDN = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{86400} \cdot \left( \int_{7h}^{22h} 10^{\frac{LA(t)}{10}} \cdot dt + \int_{22h}^{7h} 10^{\frac{LA(t)+10}{10}} \cdot dt \right) \right] \quad (3)$$

Onde:

LDN: nível de pressão sonora dia-noite ponderado em A, em dB(A);

t: período de duração da medição, em horas;

LA(t): nível de pressão sonora ponderada em A medida no tempo t.

Uma alternativa ao Ldn é o parâmetro nível de pressão sonora dia-entardecer-noite (*Day-Evening-Night Level* – Lden), na qual divide o dia em 3 períodos: dia, das 7h as 19h, anoitecer, das 19 as 23h, e noite, das 23h as 7h. Semelhantemente ao Ldn, o Lden tem um acréscimo de 5 dB para o período de anoitecer e um acréscimo de 10 dB para o período noturno, conforme a diretiva EU 2002/49/CE. A equação do Lden pode ser observada conforme equação 4:

$$LDEN = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{86400} \cdot \left( \int_{7h}^{19h} 10^{\frac{LA(t)}{10}} \cdot dt + \int_{19h}^{23h} 10^{\frac{LA(t)+5}{10}} \cdot dt + \int_{23h}^{7h} 10^{\frac{LA(t)+10}{10}} \cdot dt \right) \right] \quad (4)$$

Onde:

LDEN: nível de pressão sonora dia-anoitecer-noite ponderado em A, em dB(A);

t: período de duração da medição, em horas;

LA(t): nível de pressão sonora ponderada em A medida no tempo t.

De acordo com Filippone (2014) as métricas mais utilizadas para monitoramento acústico envolvendo ruído aeroviário são: *Effective Perceived Noise Level* (EPNL), *Sound Exposure Level* (SEL), Lden, nível de pressão sonora máxima (Lmax) e LAeq.

### 4.3. Ruído aeroviário

O ruído aeroviário pode ser classificado como um ruído intermitente, com eventos cíclicos com altos valores de pressão sonora seguido de períodos de silêncio com apenas ruído de fundo (NETO, 2010). O ruído aeroviário apresenta maior impacto sonoro nos processos de decolagem e aterrissagem, por estar mais próximo ao solo e de comunidades circunvizinhas a aeroportos, e possui duas fontes principais de ruído: o ruído aerodinâmico e o ruído de propulsão.

#### 4.3.1 Ruído aerodinâmico

O ruído aerodinâmico é originado pela passagem tangente do ar sobre a estrutura da aeronave em movimento com alta velocidade causando turbulência molecular na estabilidade da atmosfera e variações de pressão no ar, aumentando a força de arraste. O ruído aerodinâmico varia de intensidade conforme a velocidade do avião, altitude do voo, densidade do ar e estrutura da fuselagem do avião, como o trem de pouso, janelas, asas, turbinas, *slats*, *flaps* e portas de acesso, podendo ser observado na Figura 4 (MORAIS et al, 2008; PIXININE, 2013; PROENÇA et al., 2014).

FIGURA 4: RUÍDO AERODINÂMICO: REALÇADOS EM AZUL REPRESENTAM O RUÍDO AERODINÂMICO NA FUSELAGEM DO AVIÃO E EM VERMELHO O RUÍDO DE PROPULSÃO



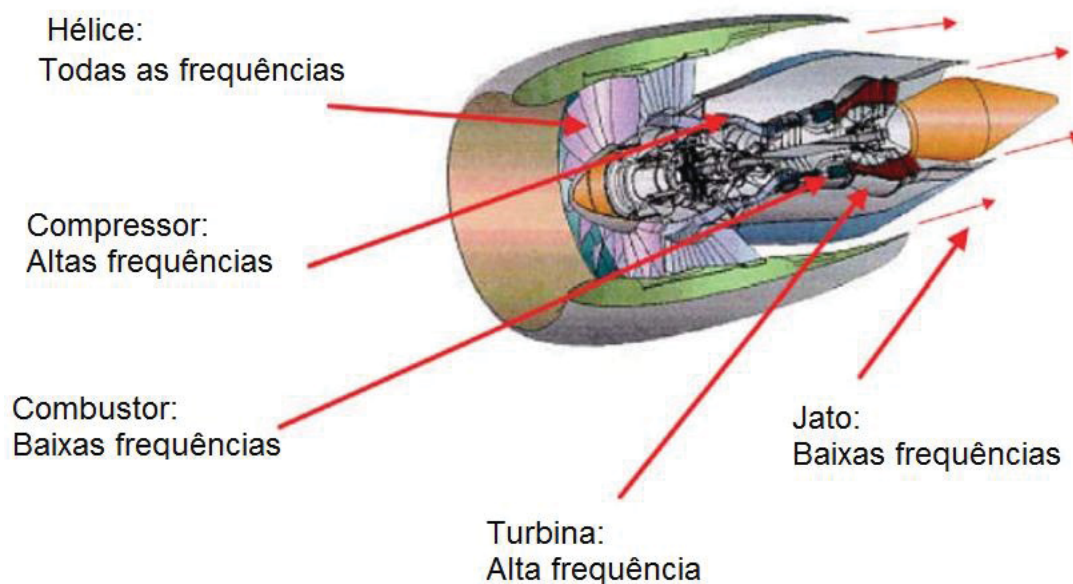
FONTE: Adaptado de Proença et al (2014).

Além da passagem do ar na fuselagem do avião, outro fator gerador de ruído, é associado à mistura de gases da exaustão da turbina. Conforme Long (2006), o ruído de aviões a jato ocorre na interação dos gases em alta velocidade e temperatura, no escape da combustão do querosene na turbina, em contato com a camada estável da atmosfera, usualmente mais fria, gerando variações de pressão que irradiam som em 5 a 8 metros atrás do bico de exaustão.

#### 4.3.2 Ruído de propulsão

O ruído de propulsão é associado à operação de pouso e decolagem e são originadas no motor, com propulsão por hélice, e nas turbinas, por propulsão a jato, das aeronaves. Durante o processo de decolagem, a aeronave necessita de potência máxima de seu sistema de propulsão para gerar um empuxo forte o suficiente para vencer a inércia e alçar voo. O ruído de propulsão total é a soma do ruído de cada componente mecânico do sistema de propulsão como: ventilador, compressor, turbina, jato e combustor, cada um com sua tonal de frequência, como podem ser observados na Figura 5 (ICAO, 2007).

FIGURA 5: COMPONENTES MECÂNICOS GERADORES DE RUÍDO NO SISTEMA DE PROPULSÃO A JATO.



FONTE: Adaptado de ICAO (2007).



A percepção, das comunidades no entorno do aeroporto, ao ruído gerado no pouso e/ou decolagem das aeronaves é influenciada pelo porte da aeronave, pela potência das turbinas, comprimento da pista, da velocidade de decolagem e do gradiente de subida (MORAIS et al., 2008; ICAO, 2007).

#### 4.4 Mitigação e controle de ruído aeroviário

No princípio, as aeronaves possuíam sistemas de propulsão com base em motores e hélices, como é o caso dos aviões monomotores e bimotores. Com o passar do tempo e o desenvolvimento da tecnologia e do investimento na aviação, os aviões convencionais de motores deram espaço a aeronaves mais modernas, maiores, mais rápidas e com sistemas de propulsão a jato. Entretanto, essa substituição, economicamente mais viável, teve um impacto ambiental e social negativo em função do aumento do ruído.

De maneira a controlar e reduzir o ruído gerado em excesso pela utilização de aeronaves mais ruidosas em função do sistema propulsor a jato ou turbinas, o *Institute Of Civil Aviation Organization* (ICAO) elaborou, em 2007, um programa com metas de redução de ruído nomeado *balance approach*, ou, balanço equilibrado. De acordo com o Instituto, o programa consiste na identificação dos problemas de ruído em cada aeroporto através do monitoramento de poluição sonora e 4 elementos que interagem entre si:

- 1) Redução de ruído na fonte;
- 2) Gestão de uso e ocupação de solo;
- 3) Amortecimento de ruído em procedimentos operacionais;
- 4) Restrições operacionais.

Relacionado à redução de ruído na fonte, trata-se de controle de ruído no sistema de propulsão ou na estrutura aerodinâmica das aeronaves. De maneira a reduzir o ruído nos sistemas de propulsão, criou-se um conjunto de normas e certificações acerca do ruído em aeroportos em que qualquer aeronave deve ser submetida. O processo de certificação é chamado *Environmental protection – volume I – Aircraft noise*, anexo 16, na qual classifica as aeronaves conforme a emissão de ruído. As aeronaves eram classificadas em 3 tipos. Posteriormente, no 5º encontro do *Comitee on Aviation Environmental Protection* (CAEP/5), em 2005, foi incluída mais uma certificação, resultando em certificações conforme emissão de



ruído. A nomenclatura da certificação de ruído é capítulo, sendo os seguintes certificados:

1) NNC: Aeronaves cuja fabricação se deram antes da criação da norma, são classificadas de *non noise certified* (NNC) e, por isso, não possuem certificação. Usualmente são mais ruidosas e deveriam ser retiradas de frota até 2002.

2) Capítulo 2: Aeronaves fabricadas até outubro de 1977, emitem menos ruídos que as NNC, como o Boeing 727 e Douglas DC-9, por exemplo.

3) Capítulo 3: Aeronaves a jato fabricados após outubro de 1977 e antes de janeiro de 2006; aviões a hélice com pedido de certificado após janeiro de 1985 e antes de janeiro de 2006. São aeronaves menos geradoras de ruído e mais modernas. Boeing B-737-300, Boeing B-767 e Airbus A-319 são aeronaves capítulo 3.

4) Capítulo 4: Todas as aeronaves a jato e a hélice com pedido de certificado após janeiro de 2006. Sendo mais restritiva relacionada ao ruído em relação ao capítulo 3, na qual inclui a inserção de materiais absorvedores de som, reduzindo drasticamente as emissões de ruído em até 40 dB, conforme a Figura 6 (ICAO, 2007).

Ainda se incluem, na regulamentação, os seguintes capítulos de classificação:

5) Capítulo 5: Todas aeronaves à hélice com massa acima de 5,7 toneladas na qual o protótipo foi realizado anteriormente a janeiro de 1985.

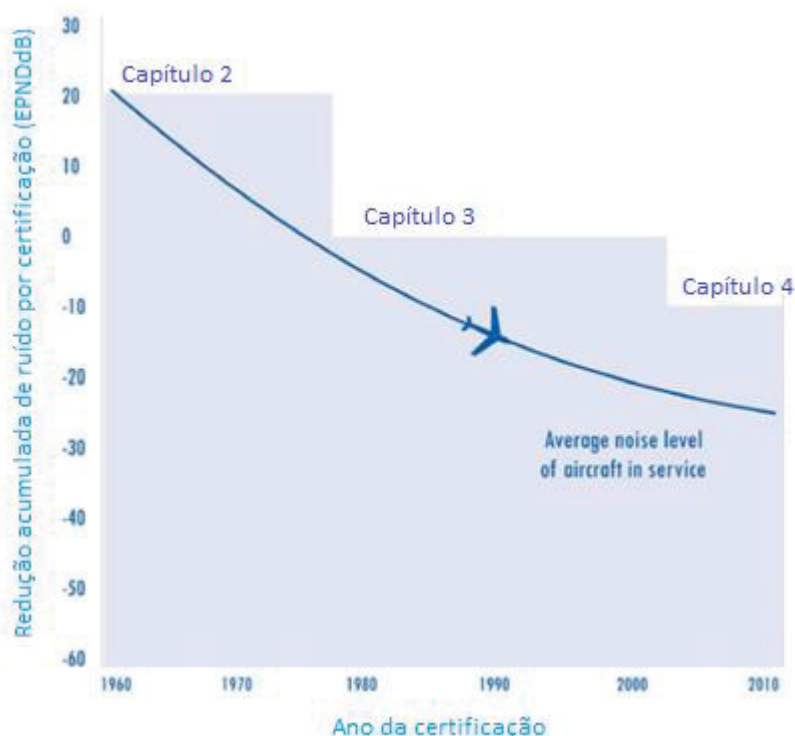
6) Capítulo 6: Todas as aeronaves á hélice com massa acima de 9 toneladas na qual a certificação foi homologada até novembro de 1988.

7) Capítulo 8: Todos helicópteros excetos utilizados na agricultura e combate a incêndio.

8) Capítulo 10: Aeronaves com massa de até 9 toneladas na qual a certificação foi homologada após novembro de 1988.

9) Capítulo 11: Helicópteros com massa de decolagem de até 2,7 toneladas.

FIGURA 6: PROGRESSO ACUMULADO DA REDUÇÃO DE RUÍDO NA FONTE ATRAVÉS DE CERTIFICAÇÃO.



FONTE: Adaptado de ICAO (2007).

Para reduzir o impacto sonoro entre os aeroportos e as comunidades no seu entorno, os aeroportos devem prever um plano de uso e ocupação de solo em conjunto com a política local, de maneira a considerar os fatores sociais, econômicos e culturais de seu local de operação. O elemento de uso e gestão do solo contempla ações de ordenamento e zoneamento territorial com atividades compatíveis com os níveis de ruídos estimados nas atividades no aeroporto e que mantenham as operações das aeronaves seguras e eficientes.

O zoneamento deve priorizar atividades condizentes com a exposição ao ruído como áreas de lazer, agricultura e atividades industriais, que não são afetadas de maneira tão agressiva pela exposição ao ruído aeroviário; em contrapartida, o zoneamento deve proibir ou não incentivar o desenvolvimento de áreas residenciais que incluem habitações familiares, escolas, hospitais e igrejas. Outro fator importante do zoneamento e uso do solo é o impedimento de invasão de moradores próximos a pista. Alguns exemplos de instrumentos de gestão e uso do solo são: zoneamento de ruído através de normas e legislações com valores permitidos, aquisição de terras pelo aeroporto e realocação de moradores, programas de isolamento de ruído e normas relacionadas ao isolamento acústico em edificações (ICAO, 2007).

O terceiro elemento, procedimentos para redução de ruído, envolve um conjunto de procedimentos operacionais no aeroporto para reduzir o ruído gerado na pista. Alguns exemplos de procedimentos específicos para a redução de ruídos, conforme o ICAO (2007) são elencados abaixo:

- Pistas de decolagem e aterrissagem mais afastadas dos zoneamentos urbanos concentrados;
- Reboque de aviões por caminhões até a garagem;
- Especificar padrões de partida para cada aeronave em função da potência;
- Priorizar decolagens mais íngremes e menos extensas em solo;
- Subida em velocidade constante até a altitude de viagem inicial.

Por fim, o último elemento, restrições operacionais, é definido como “qualquer ação relacionada ao ruído que limita ou impede o acesso de uma aeronave ao aeroporto”. De acordo com o ICAO (2007), as restrições de operações podem ser classificadas como globais, específicas, parciais e progressivas.

A restrição global refere-se a todo fluxo de aeronaves de um aeroporto em função da emissão de ruído; restrições específicas relacionam-se em função de algum grupo de aeronaves de acordo com o ruído gerado; restrições parciais contemplam limites horários e diários para o tráfego de certas aeronaves ou uso ou não de cabeceiras de voo; restrições progressivas contemplam a redução progressiva do tráfego ou da emissão de ruído dentro de um período de tempo estimado, como meta. A tabela 2 indica alguns métodos de restrições operacionais para redução de ruído:

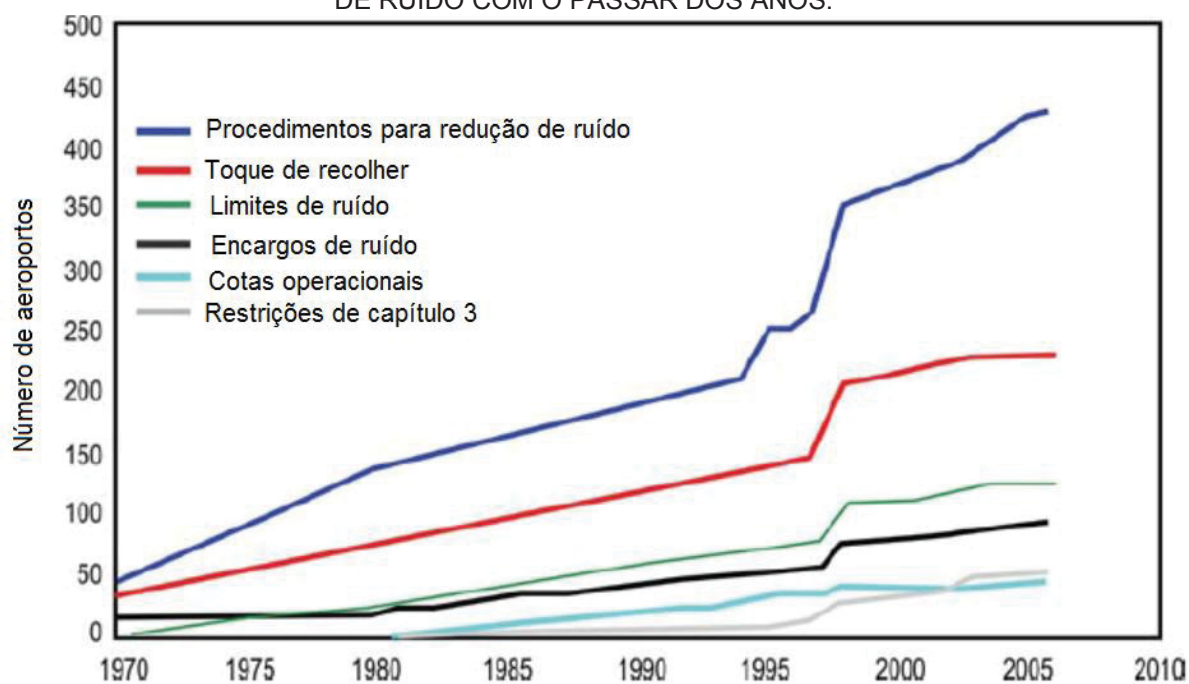
TABELA 2: EXEMPLOS DE RESTRIÇÕES OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DE RUÍDO.

Restrição operacional	Definição
Regras de limite	Número máximo de operações que não pode ser excedido em um período do ano ou dia.
Cotas de ruído	Limitar o número de ruído por aeronave dentro de uma área sobre ou ao redor do aeroporto por um determinado tempo, ou seja, define a exposição de ruído da comunidade.
Regras de não adição	Restrição de aeronaves destinadas a proibir novas operações de aeronaves ou em função da certificação de ruído.
Natureza dos voos	Restrições conforme a natureza do voo, através da restrição de certos tipos de voos, como treinamento e verificações, em determinados períodos do dia.
Restrições noturnas	Restrições de voo no horário noturno em função da sensibilidade sonora neste período.
Toque de recolher	Limitações de decolagem/pouso de aeronaves específicas em/ou pistas específicas por um período determinado

FONTE: Adaptado de ICAO (2007).

A Figura 7 indica o crescimento do número de aeroportos, globalmente, que programaram medidas de restrições operacionais:

FIGURA 7: NÚMERO DE AEROPORTOS QUE IMPLEMENTARAM MEDIDAS PARA CONTROLE DE RUÍDO COM O PASSAR DOS ANOS.



FONTE: Adaptado de ICAO (2007).

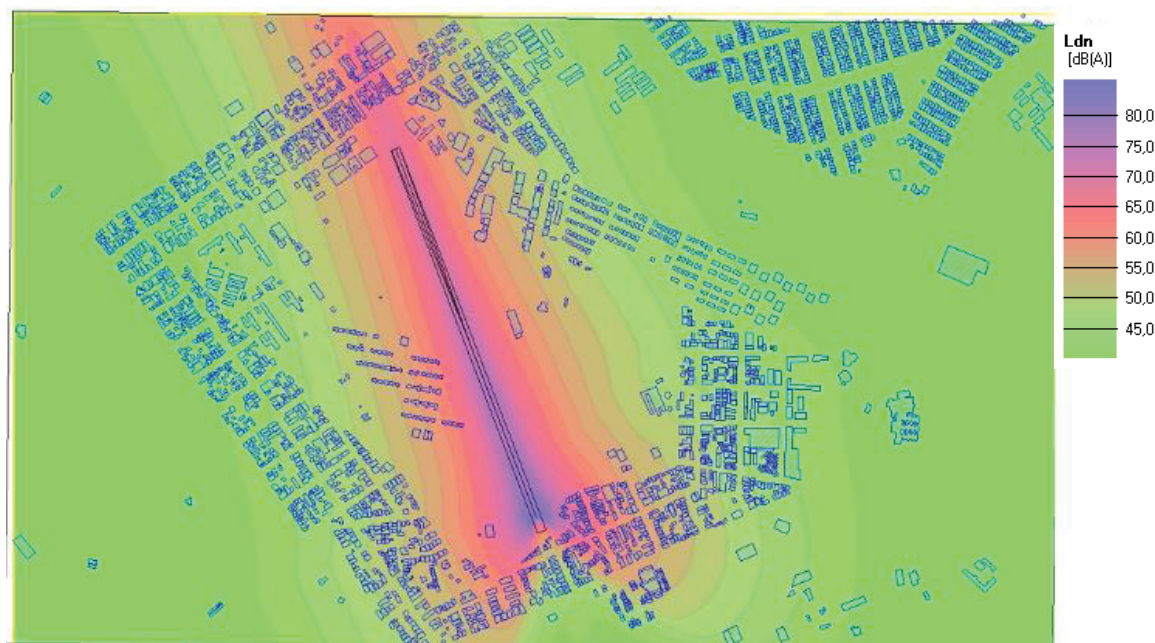
#### 4.5 Curvas isofônicas

Curvas isofônicas são curvas de igual nível de incômodo sonoro (NBR, 1990; DINATO, 2011). As curvas isofônicas podem ser associadas às curvas de nível, pois representam a união de pontos com a mesma quantificação, formando uma linha de valor constante de ruído causado por um conjunto de aeronaves em um determinado tempo e espaço (VALIM, 2006; NUNES, 2005).

As curvas isofônicas são geradas através de medições e/ou simulações matemáticas e/ou computacionais do ruído gerado no solo pela operação de aeronaves. Os métodos computacionais possuem ampla diversidade de dados de entrada para a criação das curvas isofônicas, mas, no geral, dependem da potência do motor, reversão do fluxo dos reatores na aterrissagem, ruído emitido nos testes de certificação, condições meteorológicas e presença de superfícies absorvedoras (DINATO, 2011).

As curvas de ruído apresentam caráter trivial para auxiliar na tomada de decisões no controle e mitigação de ruído aeroviário e na identificação de áreas afetadas pela poluição sonora atual, bem como possibilitam o prognóstico em cenários futuros de ampliações de pistas, de tráfego ou de medidas mitigadoras. Os aeroportos devem possuir um mapeamento de áreas expostas à poluição sonora para prever um zoneamento urbano e territorial adequado, a fim de reduzir a população afetada pelo ruído excessivo (NUNES, 2005). A Figura 8 demonstra o mapeamento acústico simulado no software *SoundPlan* 8.0 de um cenário fictício no Aeroporto Bacacheri. Importante ressaltar que as curvas isofônicas podem ser confeccionadas indicando diversos parâmetros como LAeq, LAmáx, Lden, Ldn, Ld, Ln e Le.

FIGURA 8: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS PARA SITUAÇÃO FICTÍCIA NO AEROPORTO BACACHERI



FONTE: O autor (2019).

#### 4.6 Mapeamento acústico

Em grandes cidades, a população está constantemente exposta a ruídos ambientais, seja ruído de origem rodoviário, ferroviário, aeroviário, atividades de construção civil ou industrial, influenciando de maneira direta a qualidade de vida, a saúde e o comportamento social. Em função disso, as comunidades que se localizam em zonas críticas de exposição ao ruído protestam constantemente pela melhoria na qualidade acústica do ambiente através de leis, projetos e programas de redução de ruído.

O mapeamento acústico ou mapeamento estratégico de ruído é uma ferramenta importante e muito útil para auxiliar os gestores governamentais e de empresas privadas a realizarem o diagnóstico de situações atuais, como a identificação de áreas com altos valores de poluição sonora, e, criar cenários futuros de poluição sonora em áreas de interesse, como, por exemplo, aumento do fluxo de aeronaves em um aeroporto internacional, ampliação de estradas e/ou criação de um parque industrial (BRÜEL & KJAER, 2017; OZKURT, 2014).

Mapas de ruído são a apresentação de um ambiente de interesse através de um determinado indicador de ruído, cuja função é indicar quantitativa e qualitativamente a população ou a área exposta ao ruído através de contornos e

áreas coloridas para cada nível de pressão sonora, usualmente de 5 em 5 dB(A), porém, podendo ser em intervalos menores (EPA, 2011; OZKURT, 2015; ZANNIN, 2019). A utilização de mapeamento estratégico do ruído já vem sendo utilizado no continente europeu, através da Diretiva EU END 2002/49/EC prevê para todos os estados membros da União Europeia com cidades com mais de 250.000 habitantes deveriam apresentar mapas estratégicos de ruído até 30 de junho de 2007.

Os mapas de ruído são criados a partir de modelagens computacionais que calculam a propagação do som em ambientes abertos emitidos por fontes específicas. Cada software apresenta sua diversidade metodológica e interativa de interface e de dados de entrada, mas no geral, os dados de entrada são: topografia do local, edificações na área, vegetação, condições climáticas, existência de barreiras acústicas ou superfícies absorventes de som e os detalhes relevantes em função da fonte sonora de interesse (EPA, 2011).

Com o desenvolvimento avançado da computação, é possível gerar mapas de ruído com malha de cálculo de metro em metro, mapas em 3D e inserir inúmeros pontos receptores em diversas alturas para visualização detalhada de diversos pontos sensíveis e críticos; porém, quanto maior o detalhe no modelo de cálculo, maior a demanda temporal e computacional para simulação (OZKURT, 2014)

Kang (2007) cita alguns softwares que são utilizados para o mapeamento acústico como o *Predictor*, *Soundplan*, *IMMI*, *INM*, *Mithra*, *CadnaA*, *RayNoise*, *GipSynoise*, *Arcgis* com pacotes específicos de ruído e *Fluidyn*.

#### 4.7 Modelo ECAC CEAC doc. 29/1997

O modelo ECAC doc. 29, criado em 1997 pela Conferência Europeia de Aviação Civil, na França, é um modelo amplamente utilizado para confecção de mapas de ruído aeroviário na Europa (HAMAMCI et al., 2017; OZKURT et al., 2015; OZKURT, 2014; SARI et al., 2014; VOGIATZIS, 2012).

Conforme o guia de aplicação, o modelo ECAC consiste em 3 módulos: pré-processamento, ruído de motor e pós-processamento.

No módulo pré-processamento, inserem-se os dados relativos ao aeroporto de interesse, como coordenadas do aeroporto, pistas de decolagens, localização do ponto de referência da pista, localização dos pontos de decolagens e descidas na



pista e informações referentes ao movimento de manobras das aeronaves, quando aplicado.

O módulo ruído de motor é subdividido em “*Aircraft Database*” e “*Noise Engine*”. O submodelo “*Aircraft Database*” engloba a identificação e seleção, individual, das aeronaves que operam nas pistas do aeroporto. Cada aeronave possui um banco de dados referentes à sua emissão de ruído, perfil de decolagem, velocidade, características físicas, como altura, peso, tipo de engrenagem de partida e potência. Este banco de dados das aeronaves é obtido através de experimentos de análise pela organização intergovernamental EUROCONTROL.

Para aeronaves com perfil de ruído semelhantes, o software agrupa-as para facilitar o modelo computacional. O software *SoundPlan 8.0* já possui uma biblioteca de 150 tipos de aeronaves, incluindo aeronaves pequenas monomotores até aeronaves militares extremamente pesadas a jato.

O submodelo *Noise Engine* consiste na aplicação do módulo citado acima se somando com os fatores de atenuação de ruído, como a atenuação do ar, atenuação no solo e diretividade lateral da fonte. Este módulo é o responsável pela interação do ruído emitido com os elementos presentes no cenário e nos receptores inseridos, o que permite a identificação do parâmetro acústico.

Ainda sobre o módulo de ruído, o agrupamento das aeronaves é feito conforme as características individuais das aeronaves, como: máxima carga de decolagem, tipo do motor, certificação de ruído ICAO e localização dos motores na aeronave. Por fim, neste módulo, inserem-se os dados relativos ao tráfego aéreo, como número de movimentos por período do dia para cada aeronave.

No modelo, durante a decolagem, há a segmentação do movimento da aeronave, sendo o nível de pressão sonora dependente da velocidade de decolagem e distância percorrida para alçar voo, atingindo o valor máximo de pressão sonora.

A equação (5) do ruído de um único evento ( $L_e$ ), em dB, é expressa abaixo:

$$L_e = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{t_0} \cdot \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L(t)}{10}} \cdot dt \right) \quad (5)$$

Onde:

- $t_0$  é a referência do tempo de para integração, em unidade de tempo;
- $t_1$  e  $t_2$  são os tempos para que  $L(t)$  esteja até 10 dB do nível de pressão máxima, por unidade de tempo;



-  $L(t)$  é o nível de pressão sonora no instante de tempo.

Para o nível de pressão sonora acumulado ( $Leq,w$ ), tem-se a equação (6):

$$Leq,w(x,y) = 10 \cdot \log \left( \frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k M_{i,j} \cdot 10^{\frac{Le_{ijk}(x,y)}{10}} \right) \quad (6)$$

Sendo  $M_{ij}$  o termo simplificado para acumulação de operações, observado na equação 7:

$$M_{ij} = g_{day} \cdot N_{ij,day} + g_{evening} \cdot N_{ij,evening} + g_{night} \cdot N_{ij,night} \quad (7)$$

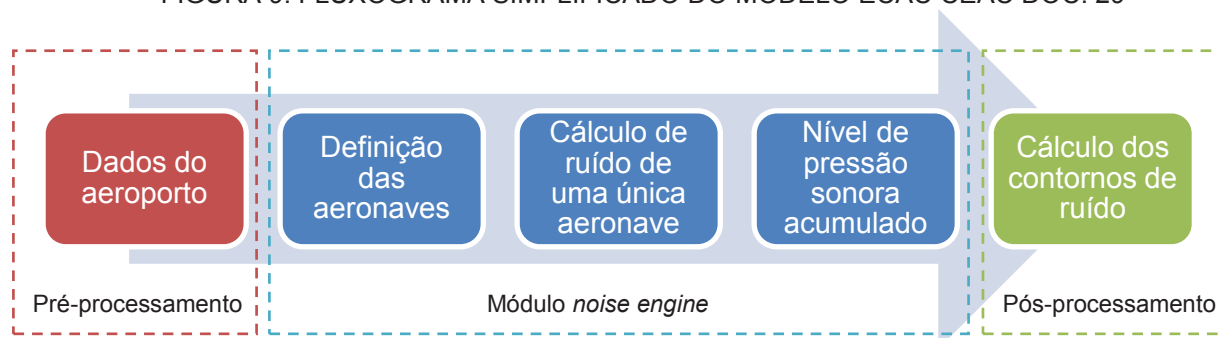
Onde:

- $i$  é índice para o tipo ou categoria da aeronave;
- $j$  é o índice da rota de voo;
- $k$  é o índice para segmentação da rota de voo;
- $g$  é o fator de período do dia, variando de 0 a 1;
- $N_{ij}$  é o número de operações por período do dia para a aeronave ( $i$ ) e a rota ( $j$ );
- $Le_{ijk}$  é a pressão sonora de um único evento para cada aeronave, rota e segmentação;

O terceiro módulo do modelo, pós-processamento, reúne os dados resultantes dos dois módulos acima e confecciona os contornos ou curvas de ruído conforme espaçamento da malha. O documento retifica que, quanto menor o espaçamento da malha, maior a precisão do contorno de ruído.

O processo sequencial é simplificadaamente ilustrado na Figura 9:

FIGURA 9: FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO MODELO ECAC CEAC DOC. 29



FONTE: O autor (2019).

## 4.8 Legislação e normas para ruído aeroviário

### 4.8.1 Lei Municipal de Curitiba nº 10.625/2002 -

A lei municipal da cidade de Curitiba número 10.625, criada em 2002, dispõe sobre ruídos urbanos, proteção do bem-estar e do sossego público. Define o ruído como som capaz de causar perturbação ao sossego público ou efeitos psicológicos e fisiológicos negativos em seres humanos e animais. Para fins de aplicação da lei, divide-se o dia em três períodos: diurno, das 07 horas e 01 minuto às 19 horas; vespertino, das 19 horas e 01 minuto às 22 horas e noturno, das 22 horas e 01 minuto às 07 horas. A lei dispõe os valores máximos de ruído permitido por zoneamento urbano e período, conforme a tabela 3:

TABELA 3: LIMITES DE RUÍDO CONFORME ZONEAMENTO URBANO E PERÍODO DIÁRIO NA CIDADE DE CURITIBA.

Zonas de uso	Diurno [dB(A)]	Vespertino [dB(A)]	Noturno [dB(A)]
ZR-1, ZR-2, ZR-3, ZR-B, ZR-AV, ZR-M, APA-SARU, APA-SMRU	55	50	45
ZR-OC, ZR-SF, ZR-U, ZUC-II, ZT-MF, ZT-NC, ZE-E, ZE-M, ZOO, SE-CC, SE-PS, SE-OI, APA-ST	60	55	50
ZR-4, ZC, ZT-BR-116, ZUM, ZE-D, SE, SH, SE-BR-116, SE-MF, SE-CF, SE-WB, SE-AC, SE-CB, CONEC, SE-PE, SE-WB, SE-UM, SE-NC, SEI, SEHIS, SE-LE, SEVC-PASSAPUNA, SEVS-PASSAÚNA, APA-SS, Vias prioritárias 1 e 2, Vias setoriais, Vias coletoras 1, 2 e 3	65	60	55
ZS-1, ZS-2, ZES, ZI, ZEI-I (CIC), APA-SUE	70	60	60

FONTE: Prefeitura Municipal de Curitiba (2002).

A lei também define que, dentro de um raio de 200 metros de distância de hospitais, escolas, bibliotecas, hotéis e postos de saúde circunscrevem-se zonas de silêncio, enquadrando-se nas zonas de uso Zonas Residenciais – 1 (ZR-1).

#### 4.8.2 ABNT NBR 10151/19 - Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral

A norma regulamentadora NBR 10151, de 2019, tem como objetivo: I) fixar as condições para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independentemente da existência de reclamações; II) especifica um método para medição do ruído e correções se o ruído possuir características especiais; III) define o método de medição em função da pressão sonora equivalente em dB(A).

A norma prevê algumas condições de medição para ambientes externos, como: 1) proteção do microfone do efeito do vento; 2) o medidor deve estar há 1,20 metros de altura do solo e 2 metros de distância de qualquer superfície refletora.

Além das condições de medição, a norma define um nível de critério de avaliação (NCA) de ambientes externos, como pode ser observado na tabela 4:

TABELA 4: NÍVEL DE CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO PARA AMBIENTES EXTERNOS EM DB(A).

Tipos de área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazenda	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais e escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com atividades de lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

FONTE: ABNT-NBR 10151 (2019).

#### 4.8.3 ISO 3891 - *Acoustics -- Procedure for describing aircraft noise heard on the ground*

A norma *International Organization for Standardization* (ISO) 3891, publicada em 1978, estabelece etapas e procedimentos para verificar e identificar ruído com origem na operação de aeronaves além de especificar a finalidade de utilização dos métodos. Estabelece condições físicas apropriadas para medição, como:

- Não podem haver obstruções;
- Medições de ruído só serão confiáveis apenas quando o nível máximo de ruído da aeronave exceder o nível de ruído de fundo em 20 dB;
- Medições não devem ser realizadas em superfícies absorvedoras de som, como vegetação;
- A superfície horizontal deve ter uma tolerância máxima de 3° de inclinação;
- Não pode haver pessoas próximas, pois atuam como obstrutoras;
- A velocidade do ar não deve ser superior a 5 m/s a 10 metros acima do solo.

Gerges (2000) explica, que para velocidades acima de 2 m/s, o microfone deve ser protegido por um protetor de vento.

A norma estabelece algumas condições atmosféricas para medição: medir em dias sem precipitação, baixa umidade e temperatura mínima para medição de 5 graus Celsius.

#### 4.8.4 ABNT NBR 13.368/1995 – Ruído gerado por aeronaves – monitoração – método de ensaio

A norma estabelece prevê o método para monitoração de ruído gerado por aeronaves. A metodologia consiste na medição do ruído em campo livre, ou seja, onde não há superfícies refletoras dentro da frequência de interesse. Define condições atmosféricas e técnicas de medição:

- sem eventos de precipitação;
- velocidade do vento inferior a 5 metros por segundo;
- o microfone do analisador sonoro deve estar a 1,20 metros de altura do solo;
- o microfone deve estar a 3 metros de distância de qualquer superfície refletora, e, caso a distância seja inferior a 3 metros de distância, deve-se subtrair 3 dB do valor final medido;
- a medição deve ser realizada em um intervalo mínimo de 1 hora ininterrupta nos períodos considerados críticos;
- realizar simultaneamente a medição do ruído de fundo;
- relacionar o tipo de aeronaves, horário, local do ponto;

Após a medição, a norma define um critério de avaliação de ruído aeronáutico ( $L_{ra}$ ) em função do ruído de fundo ( $L_{rf}$ ), conforme a tabela 5:

TABELA 5: NÍVEL DE CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO PARA AMBIENTES EXTERNOS EM DB(A).

Impacto sonoro	$L_{ra} - L_{rf}$ (dB)
Desprezível	< 3
Significativo	> 3

FONTE: ABNT-NBR 13368 (1995).

Por fim, a norma prevê uma avaliação de incômodo em função dos valores medidos, como pode ser observado na tabela 6:

TABELA 6: AVALIAÇÃO DE INCÔMODO GERADO PELA OPERAÇÃO DE AERONAVES.

Reclamações esperadas	Diurno (dB)	Noturno (dB)
Sem reações ou queixas	$LA_{eq} < 65$	$LA_{eq} < 55$
Queixas generalizadas	$75 > LA_{eq} > 65$	$65 > LA_{eq} > 55$
Ações comunitárias vigorosas	$LA_{eq} > 75$	$LA_{eq} > 65$

FONTE: ABNT-NBR 13368 (1995).

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1. Ruído aeronáutico

No Brasil, Nunes (2005) conduziu uma pesquisa a fim de avaliar a percepção ao ruído aeroviário do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre, em três escolas próximas ao aeroporto. A pesquisa baseou-se em questionários com alunos e professores, com tamanho de amostra de 557 participantes, a fim de identificar o grau de incômodo causado pela poluição sonora das atividades operacionais do aeroporto e medições acústicas dos níveis de pressão sonora.

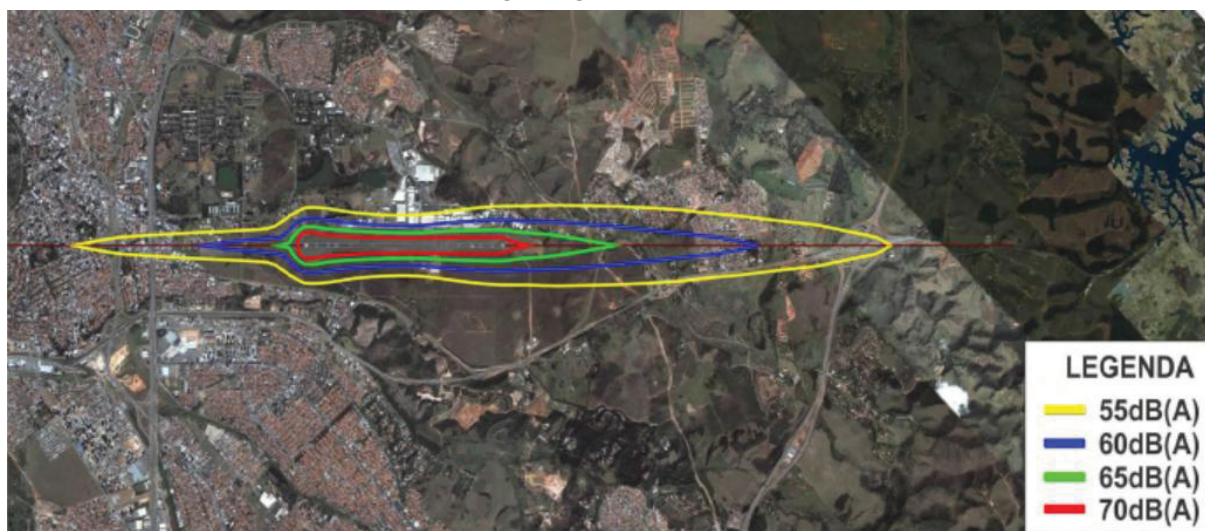
Nunes (2005) realizou as medições dos níveis de pressão sonora equivalente (LAeq) durante o período de atividade escolar, por aproximadamente 4 horas nos três turnos: manhã, tarde e noite. Os resultados dos questionários com os alunos, nas 3 escolas, indicaram que mais de 56% dos respondentes, se sentem muito incomodados em aula pelo ruído e mais de 75 % dos alunos tem dificuldades em ouvir o professor.

No questionário dos professores, Nunes (2005) concluiu que 100 % dos professores se sentem muito incomodados com o ruído em 2 escolas, e 50 % dos professores se incomodam na terceira escola, aliado a isso, mais de 83 % dos professores manifestaram necessidade de falar mais alto para vencer o ruído e poder lecionar, fato este, que altera significativamente o desempenho dos estudantes e dos professores.

Neto (2010) analisou a extensão do ruído causado pelas operações de aeronaves no Aeroporto de São José dos Campos, São Paulo, e a influência no conforto acústico da comunidade localizada na área de influência do aeroporto. A análise realizou-se através de simulação de curvas isofônicas pelo modelo *Integrated Noise Model* (INM) para verificar se as curvas isofônicas – na qual são utilizadas para o zoneamento ao redor do aeroporto - projetadas em 1984 pela Aeronáutica estariam subdimensionadas 26 anos depois; além de questionários com a população para verificar o grau de incômodo em relação a ruídos.

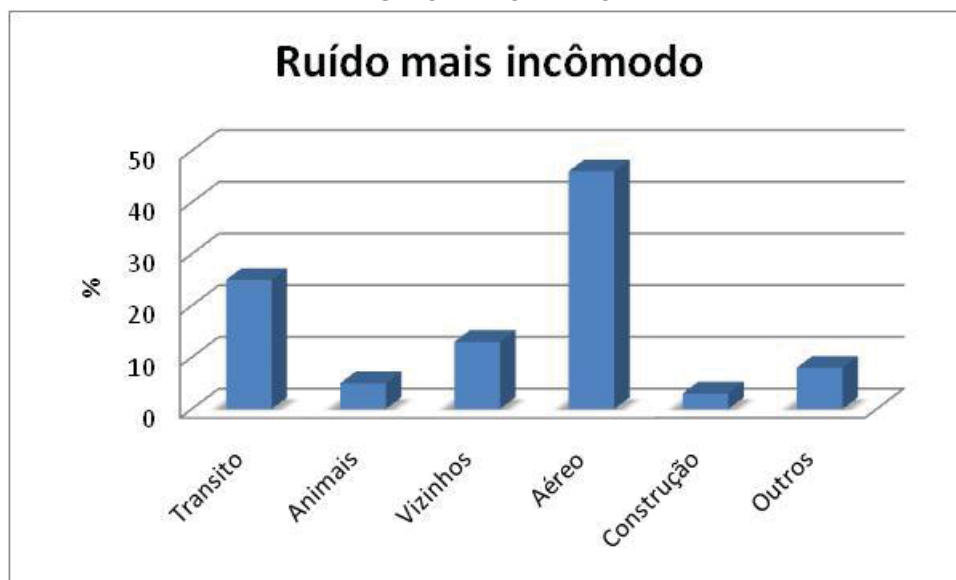
As Figuras 10e 11 mostram as curvas isofônicas simuladas em Ldn em escalas de 5 dB(A) e o resultado do questionário relacionado ao incômodo causado por ruído aeroviário, respectivamente.

FIGURA 10: CURVAS ISOFÔNICAS NO AEROPORTO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS PELO MODELO INM.



FONTE: Neto (2010).

FIGURA 11: RESULTADO DO QUESTIONÁRIO RELACIONADO AO INCÔMODO CAUSADO POR RUÍDO AEROVIÁRIO.



FONTE: Adaptado de NETO (2010).

Através das respostas do questionário (Figura 11), é possível verificar a importância do ruído aeroviário no cotidiano da comunidade próxima ao aeroporto, atingindo 42 % dos entrevistados. Entretanto, através da simulação (Figura 10), pode-se concluir que as curvas isofônicas encontram-se adequadas com o planejamento proposto pela aeronáutica em 1984, mesmo após 26 anos. O autor, através dos resultados, sugere uma atualização no plano de zoneamento próximo ao aeroporto, pois, mesmo que as curvas estejam de acordo com o zoneamento proposto, a comunidade próxima ao aeroporto tem sofrido com o ruído causado pelas aeronaves.

Dinato (2011) estudou o efeito do impacto causado pelo ruído aeroviário do Aeroporto de Ribeirão Preto, em São Paulo, sobre a população no entorno do aeroporto. Utilizou como ferramenta de análise de poluição sonora a simulação de curvas isofônicas pelo modelo INM e a medição dos níveis de pressão sonora em pontos estratégicos ao redor da pista de decolagem e pouso.

A tabela 7 indica os valores de LAeq medidos nos pontos mais relevantes e pode-se perceber que os valores medidos encontram-se na faixa de 83 a 96 dB(A).

TABELA 7: RESULTADO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO SONORA EQUIVALENTE.

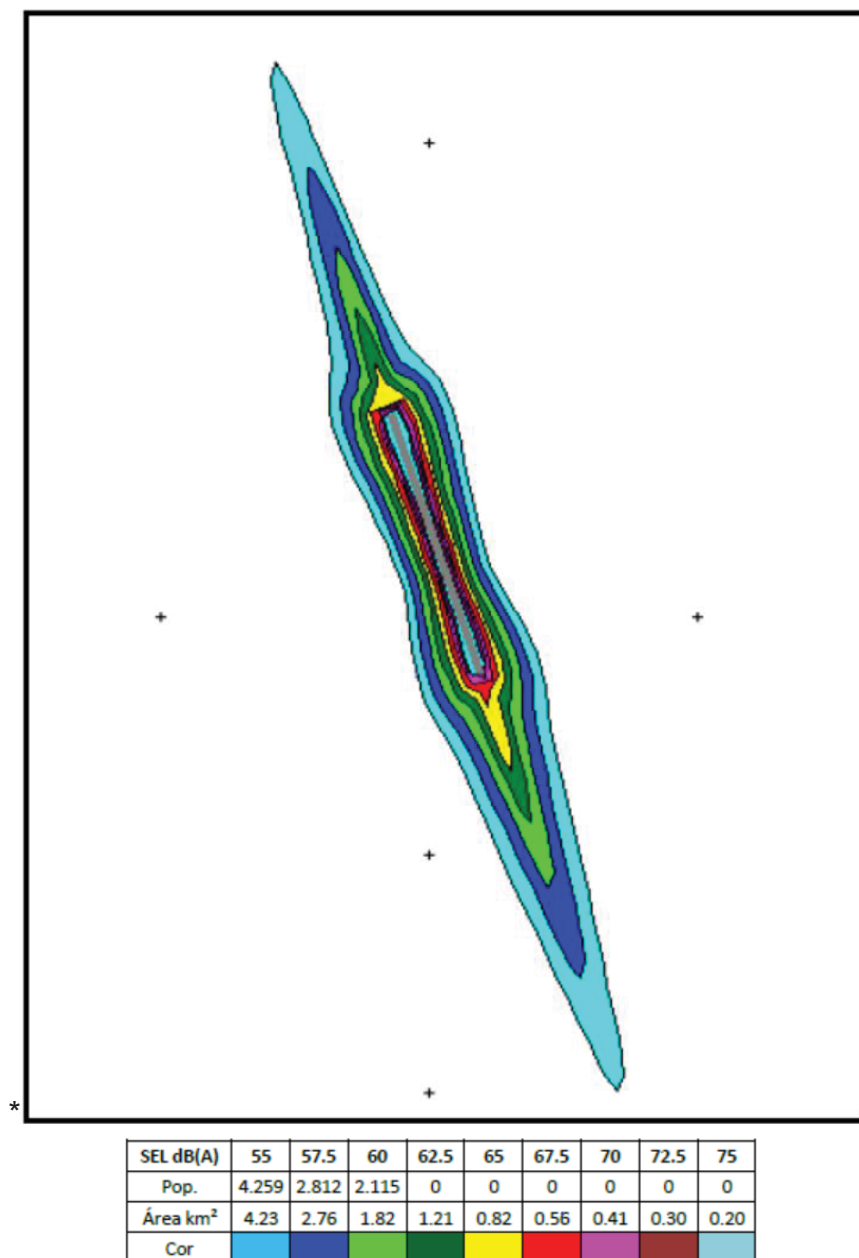
Ponto	Pressão sonora equivalente (dB(A)).
1	90,42
2	96,66
3	91,1
4	94,49
5	95,84
6	89,76
7	87,34
8	85,48
9	87,8
10	83,81

FONTE: Adaptado de DINATO (2011).

A Figura 12 indica as curvas isofônicas simuladas para o número total de voos no software INM, bem como a área e a população exposta pela curva de ruído correspondente, sendo possível verificar a influência de mais de 9000 habitantes atingidos pela exposição ao ruído entre 55 e 60 dB(A), contemplando uma área de 8,81 km<sup>2</sup>.



FIGURA 12: CURVA ISOFÔNICA SIMULADA NO INM PARA NÚMERO TOTAL DE VOOS.



FONTE: Dinato (2011).

O autor constatou, através das simulações e medições, que o grau de incômodo das residências próximas é fortemente influenciado pela direção e velocidade do vento bem como a alta temperatura, sendo necessário priorizar operações de pouso e decolagem em função dessas variáveis a fim de mitigar o ruído causado.

Vogiatzis (2012) verificou o impacto causado pela poluição sonora oriunda da operação de aeronaves no Aeroporto Internacional de Larnaka, Chipre, com fluxo atual e futuro de aeronaves para o ano de 2018, e, analisou a eficiência do zoneamento – uma ferramenta de mitigação ao ruído aeroviário - ao redor do

Aeroporto através de mapas estratégicos de ruído, por simulação no software CadnaA, e monitoramento do ruído.

O autor definiu oito pontos de monitoramento ao redor do aeroporto e utilizou as variáveis LAeq, medida por 24 horas, Lden e Lnight, sendo possível ver o resultado na Figura 13. Verificam-se valores expressivos para a variável Lnight, considerando apenas o período noturno, apresentando maior sensibilidade à exposição ao ruído devido a redução do ruído de fundo, variando de 54 a 69,9 dB(A), na qual, o valor limite regulamentado é de 60 dB(A). Para a variável Lden, verificaram-se valores na faixa de 60,0 a 76,4 dB(A), sendo que o valor limite regulamentado é de 70 dB(A).

FIGURA 13: PONTOS E RESULTADOS DE MEDIÇÃO NO ENTORNO DO AEROPORTO DE LARNAKA.

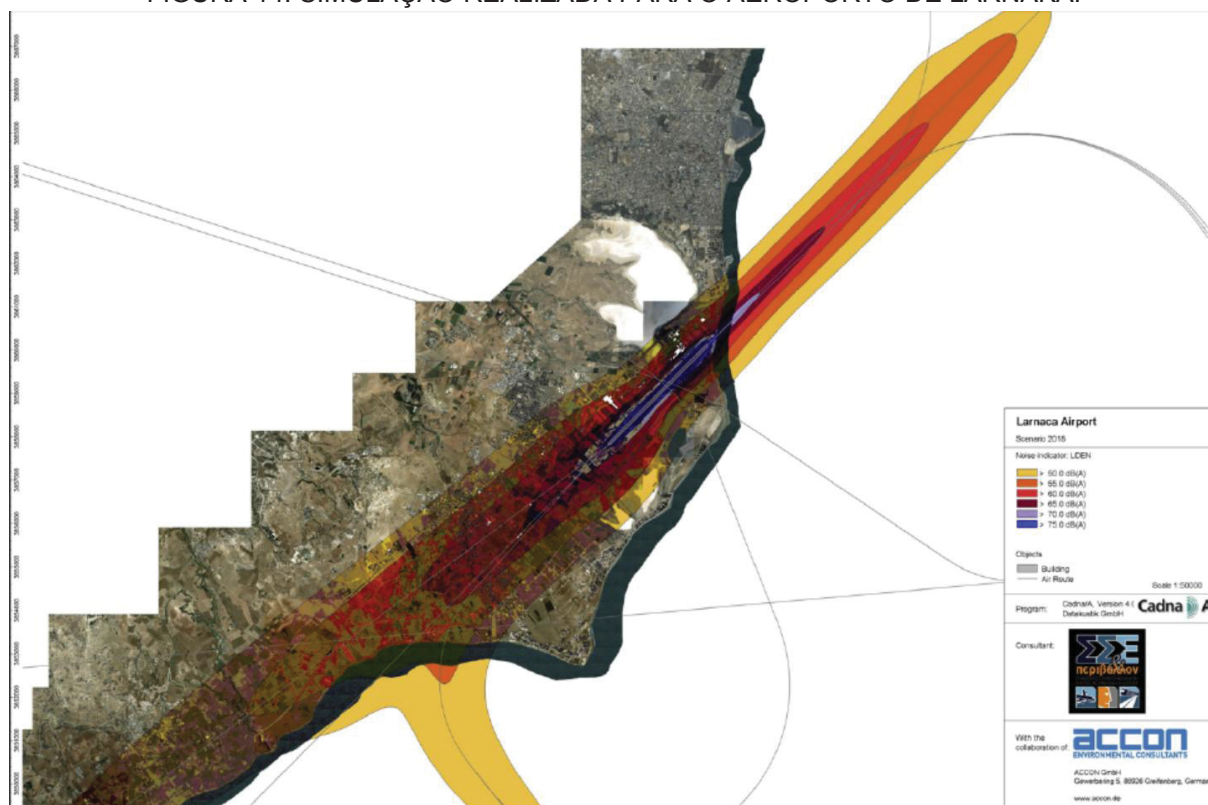


FONTE: Vogiatzis (2012).

A Figura 14 indica o cenário simulado no software CadnaA para o ano de 2018, o autor verificou que aproximadamente 26 % das residências próximas ao aeroporto, no período da noite, estão nas zonas das curvas de 50 a 65 dB(A) e 53 % das residências estão nas zonas das curvas de 50 a 65 dB(A). O autor sugere que, para mitigar o impacto causado pelo aeroporto, seja refeito o planejamento do zoneamento ao redor do mesmo, bem como, a criação de leis exigindo que as novas

residências ao redor do aeroporto sejam projetadas com isolamento acústico adequado.

FIGURA 14: SIMULAÇÃO REALIZADA PARA O AEROPORTO DE LARNAKA.



FONTE: Vogiatzis (2012).

Júnior e Garavelli (2012) iniciaram uma pesquisa a fim de avaliar o efeito do ruído aeronáutico no entorno do Aeroporto Internacional de Brasília em três zonas residenciais anexas ao aeroporto. Para isso, utilizou um questionário para uma amostra de 105 pessoas residentes nas zonas de interesse e medições para determinar o nível de ruído.

A tabela 8 indica a porcentagem dos respondentes que classificam como “muito” e “extremamente” impactante o grau de ruído gerado por rodovias e atividade aeronáutica. Os autores encontraram, através do questionário, insatisfação dos residentes de 79 %, 83 % e 76 % para as zonas I, zonas II e III e zona IV, respectivamente, sendo classificado entre moderado e extremamente ruidoso.

Já a tabela 9, indica os valores de pressão sonora equivalente obtida durante o período de monitoramento. Através dos resultados da tabela 9, pode-se perceber uma sincronização entre os valores encontrados com o resultado da tabela 8, pois os autores obtiveram valores de pressão sonora de 56 a 64 dB(A) para o período do

diurno e 56 a 60 dB(A) para o período do noturno, sendo este um período de maior sensibilidade auditiva.

TABELA 8: NÚMERO DE ENTREVISTADOS QUE CONSIDERAM IMPACTANTE O RUÍDO AEROVIÁRIO E RODOVIÁRIO POR ZONAS.

	Zona 1	Zonas 2 e 3	Zona 4
Ruído aeroviário	78 %	65 %	32 %
Ruído Rodoviário	64 %	70 %	28 %

FONTE: adaptado de Júnior (2012).

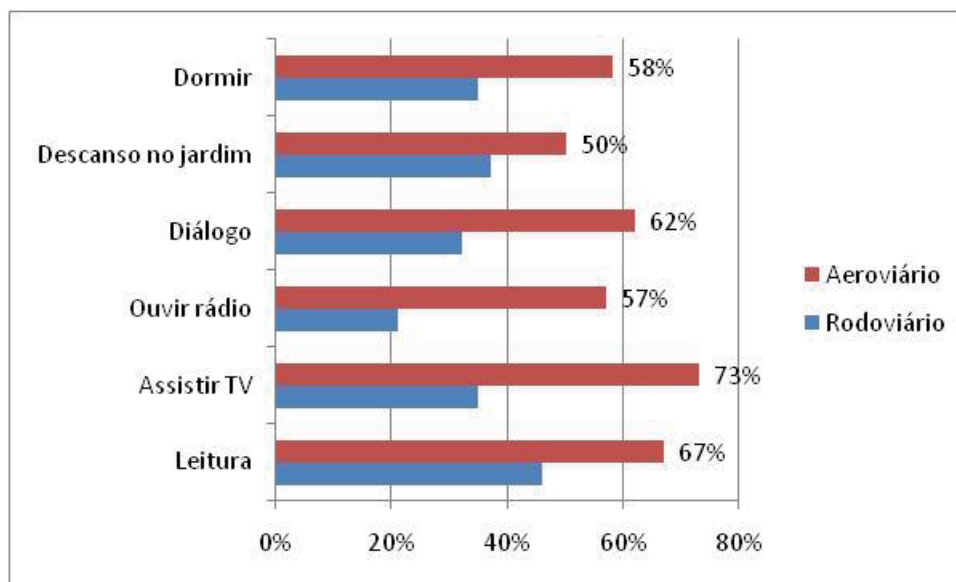
TABELA 9: VALORES DE PRESSÃO SONORA OBTIDOS NO MONITORAMENTO.

	LAeq (Diurno)	LAeq (Noturno)
Zona 1	56	56
Zona 2	64	60
Zona 3	62	58
Zona 4	61	59

FONTE: adaptado de Júnior e Garavelli (2012).

Júnior e Garavelli (2012) obtiveram também, através do questionário, o grau de influencia dos ruídos rodoviário e aeroviário nas atividades cotidianas, conforme a Figura 15. É possível verificar na Figura 15 que, no mínimo, 50 % dos entrevistados sentem-se impactados pelo ruído aeroviário nas atividades simples do cotidiano e apresentam sintomas de dores de cabeça, estresse e insônia.

FIGURA 15: INFLUÊNCIA DOS RUÍDOS AERO E RODOVIÁRIO NAS ATIVIDADES COTIDIANAS.



FONTE: Adaptado de Júnior e Garavelli (2012).

Bentes et al. (2013) analisaram e quantificaram a quantidade de pessoas altamente incomodadas pela exposição ao ruído na comunidade do entorno do Aeroporto Internacional Viracopos, em Campinas, através da simulação de curvas isofônicas pelo software INM.



A Figura 16 demonstra o resultado da simulação. Através da simulação, os autores quantificaram o número de pessoas atingidas por cada faixa de ruído, conforme a tabela 10, podendo-se perceber um número aproximado de 50 mil habitantes afetados diariamente pelo impacto sonoro causado entre as faixas de 55 a 85 dB(A).

FIGURA 16: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS NO SOFTWARE INM PARA O AEROPORTO INTERNACIONAL VIRACOPOS.



FONTE: Bentes et al (2013).

TABELA 10: ESTIMATIVA DOS RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA.

Faixa	DNL (dB(A))	Área calculada (km <sup>2</sup> )	População afetada (habitantes)
1	55-60	24.075	30.919
2	60-65	10.032	13.617
3	65-70	4.182	5.677
4	70-75	1.656	1.501
5	75-80	0,38	520
6	80-85	0,16	228

FONTE: Adaptado de BENTES et al. (2013).

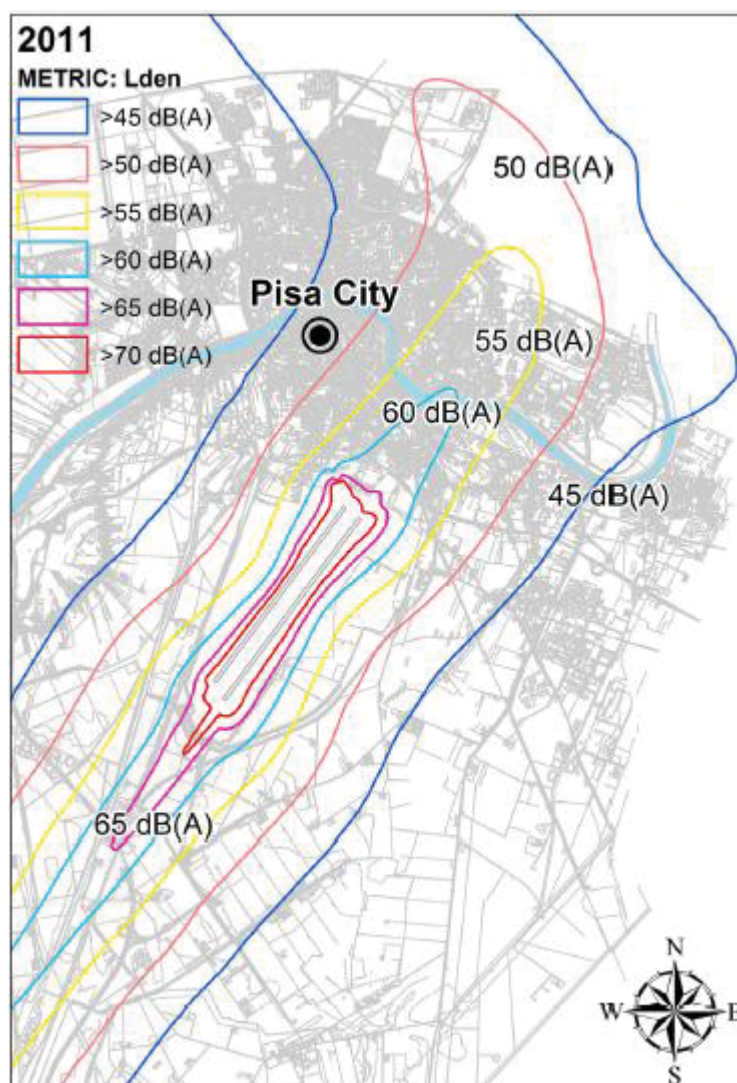
Licitra et al. (2014) realizaram o mapeamento acústico e a estimativa da população afetada pelo ruído do Aeroporto Internacional de Pisa, na Itália, na qual é predominantemente militar com duas pistas de operações. Os autores utilizaram o modelo INM para a criação das curvas isofônicas do ruído e a proposição de

cenários de redução do ruído. A simulação para situação atual do aeroporto pode ser observada na figura 1:

A estimativa de população exposta ao ruído aeroviário do Aeroporto Internacional de Pisa resultou em 13 mil habitantes afetados pela poluição sonora, com sinais de irritabilidade, nas faixas entre 55 e 60 dB(A).

Os autores propuseram 6 cenários de redução de ruído, envolvendo mudanças no perfil de elevação durante a partida das aeronaves militares. As medidas de redução simuladas geraram reduções de ruído 3 a 7,7 dB(A).

FIGURA 17: CURVAS ISOFÔNICAS SIMULADAS NO SOFTWARE INM PARA O LAEQ DIURNO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE PISA

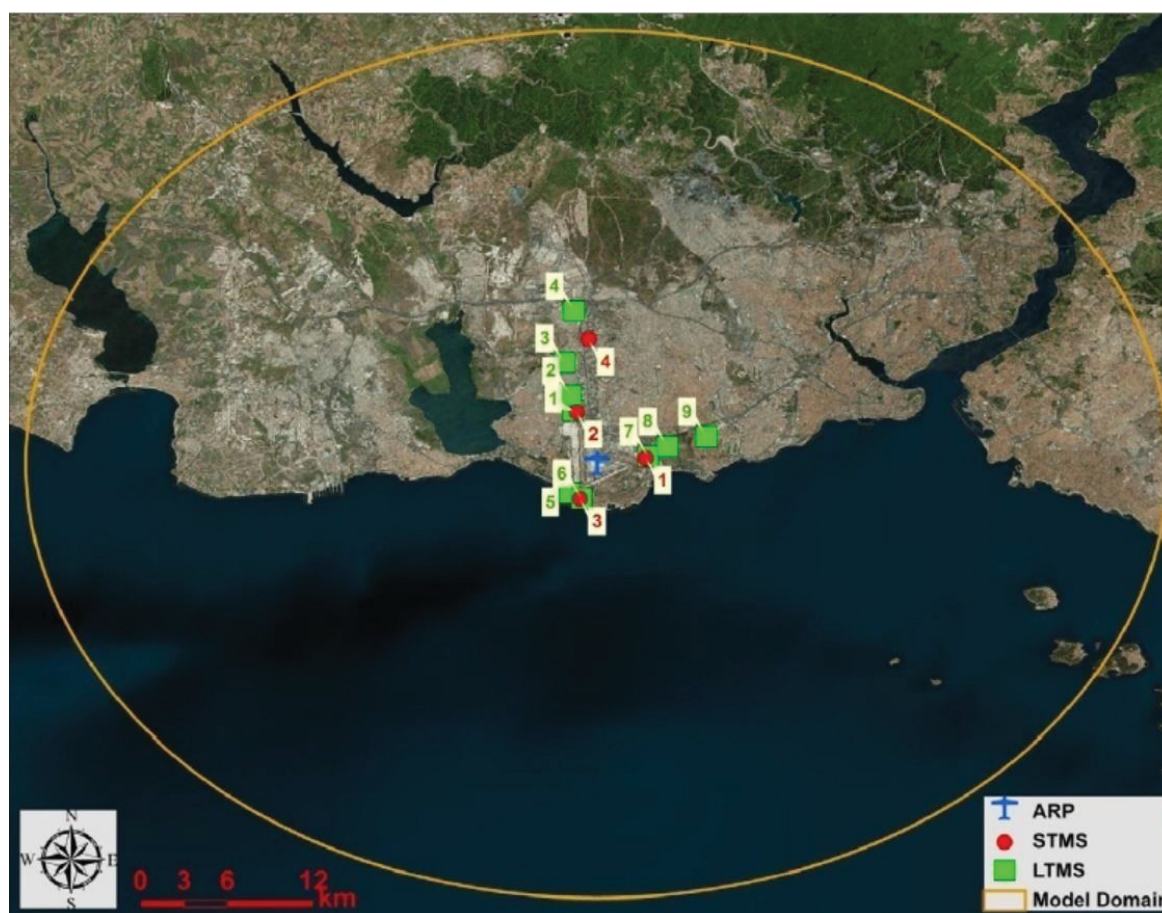


FONTE: Licitra et al (2014).

Sari et al. (2014) realizaram a análise da poluição sonora do Aeroporto Internacional de Istambul Ataturk através de medições de pressão sonora e mapeamento acústico pelo software *SoundPlan 7.1*.

Para a simulação no software Soundplan 7.1 foram necessários, como dados de entrada: dados referentes às aeronaves, dados referentes à pista do aeroporto, dados referentes ao fluxo aéreo e topografia. Para validação do modelo de simulação, foram utilizadas nove estações de monitoramento contínuo por 24 horas, de propriedade do aeroporto, chamadas de estações de monitoramento de longo termo junto com quatro pontos de medições de pressão sonora de curto tempo de monitoramento, sendo possível verificar a localização dos pontos na Figura 18. Os autores utilizaram como malha de simulação o espaçamento de 50 metros.

FIGURA 18: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DE LONGO E CURTO TEMPO.

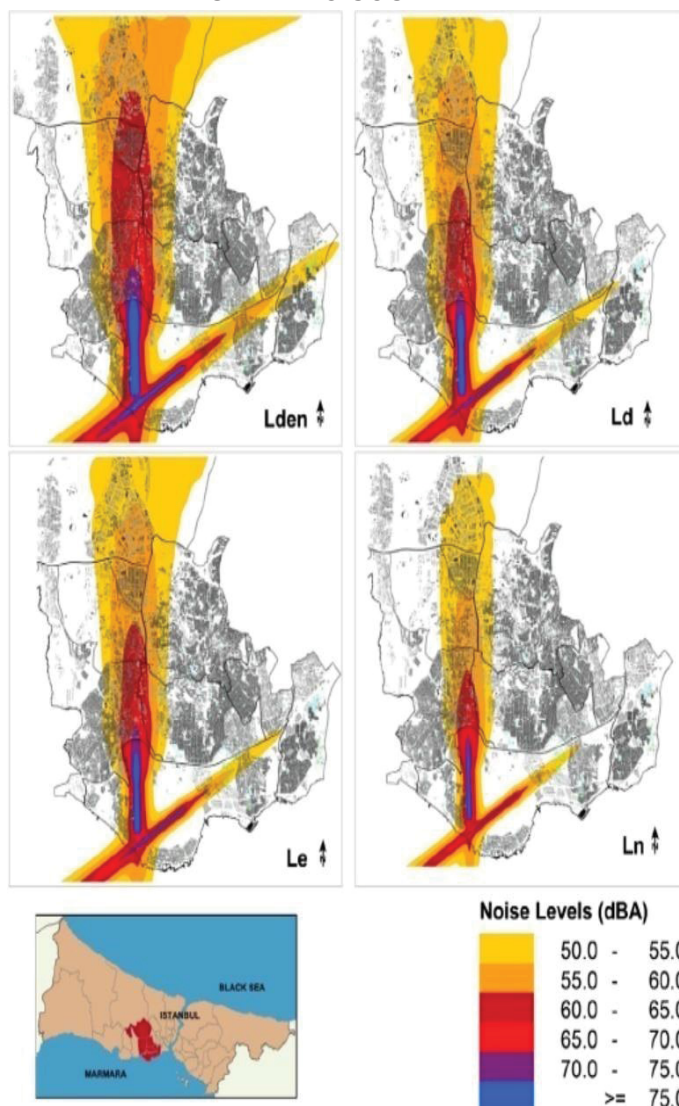


FONTE: Sari et al. (2014).

Após a inserção dos dados de entrada no *SoundPlan 7.1*, da calibração e validação do modelo, geraram-se mapas acústicos para as variáveis *Lden*, *Lday*, *Levening* e *Lnight* e o resultado pode ser visto na Figura 19.



FIGURA 19: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE INSTAMBUL ATATURK PELO SOUNDPLAN 7.1

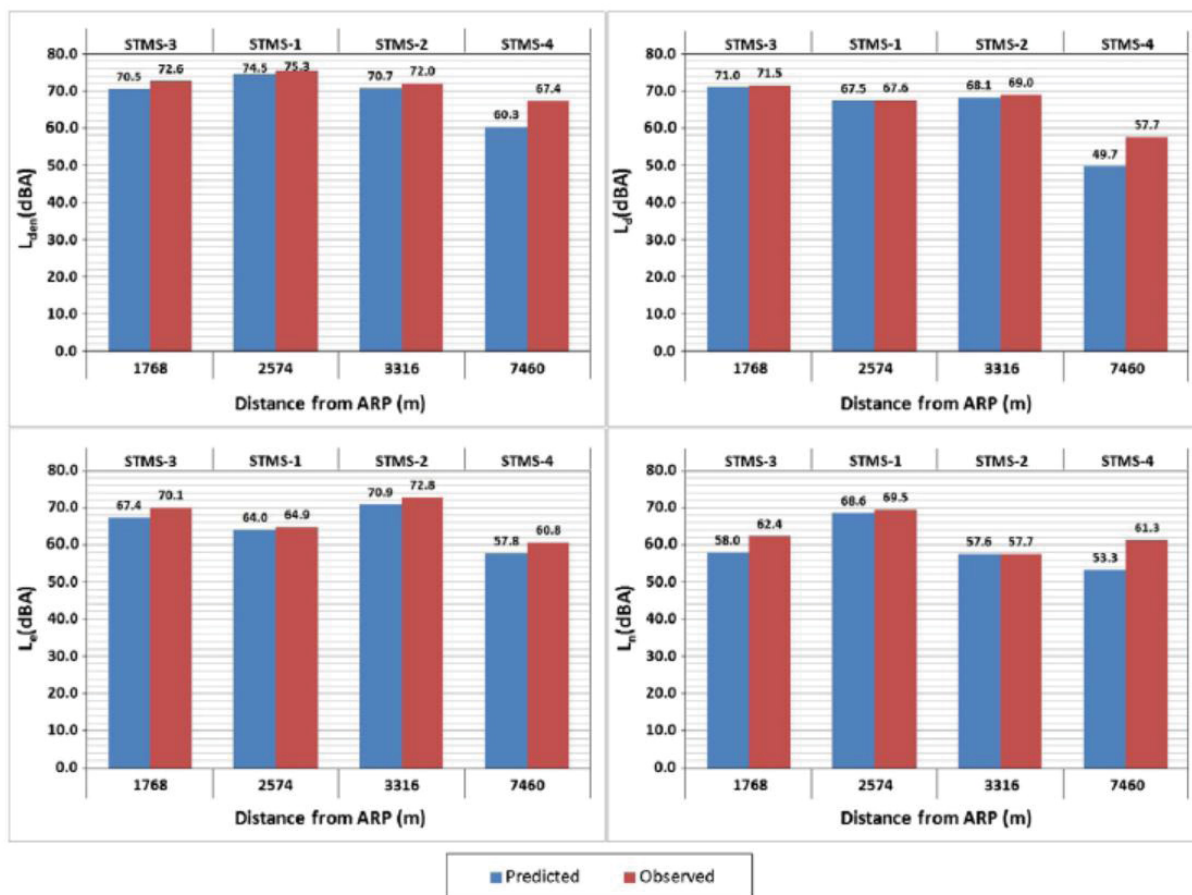


FONTE: Sari et al. (2014).

A Figura 20 demonstra a comparação entre os valores medidos e os valores simulados, apresentando um erro máximo de 7 dB(A) para o ponto de monitoramento mais afastado da pista de decolagem/pouso do aeroporto, sendo este erro associado à presença de rodovias, ferrovias e distrito industrial próximos ao ponto. Os demais pontos simulados apresentam baixo erro relativo, indicando a aceitabilidade do modelo no mapeamento acústico.



FIGURA 20: RESULTADOS CALCULADOS E MEDIDOS NAS ESTAÇÕES DE CURTO TEMPO DE MONITORAMENTO.



FONTE: Sari et al (2014).

Ozkurt (2014) estudou a situação do aeroporto no ano de 2012 e projetou situações futuras para a poluição sonora causada pelas atividades no Aeroporto Internacional de Ankara Ensenboga, Turquia. Para os cenários futuros, o autor considerou prognósticos de aumento de tráfego aéreo na perspectiva atual de negócio para os anos de 2020, 2025 e 2030; além de criar um cenário relacionado à pior situação ambiental possível, conforme tabela 11.

TABELA 11: NÚMERO DE VOÔS PARA OS CENÁRIOS PROPOSTOS NO MAPEAMENTO ACÚSTICO.

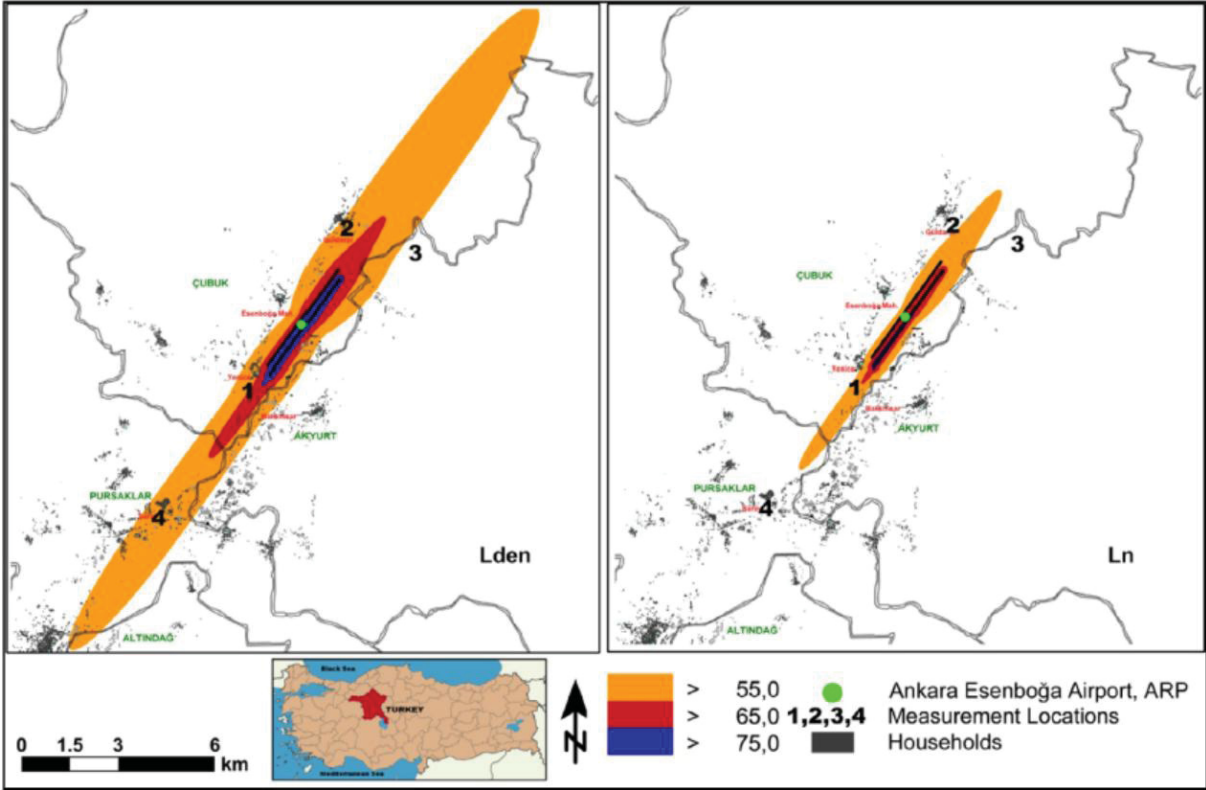
Número de voos	2012, atual	Cenário atual de expansão de comércio			Pior cenário ambiental possível		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
	85.156	87.000	112.000	142.000	106.000	148.000	206.000

FONTE: Adaptado de OZKURT (2014).

Para este estudo, o autor utilizou o mapeamento acústico através de simulações no software *SoundPlan 7.1* e quatro pontos de medições de pressão sonora nas áreas do entorno do aeroporto para validação do modelo de simulação,

com as métricas *Lden* e *Lnight*. A Figura 21 mostra o mapeamento acústico para o cenário atual e a localização dos quatro pontos de medição. A partir da simulação atual, Ozkurt (2014) quantificou a área de abrangência de cada curva de ruído e o número de pessoas atingidas pela poluição sonora, conforme a tabela 12.

FIGURA 21: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO ANKARA ESENBOGA PARA A SITUAÇÃO ATUAL DE TRÁFEGO AÉREO.



FONTE: Ozkurt (2014).

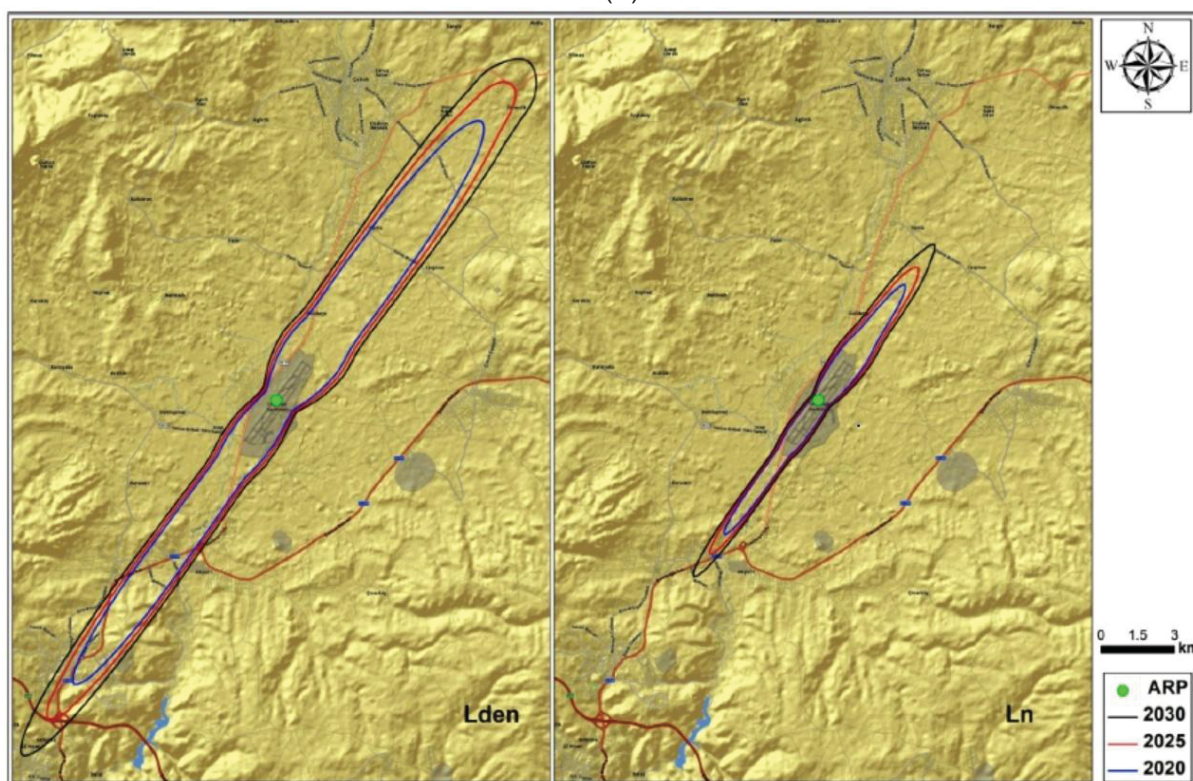
TABELA 12: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: ÁREA E NÚMERO DE HABITANTES AFETADOS PELO RUÍDO NO AEROPORTO ANKARA ESENBOGA.

Período	Faixa de ruído (dB(A))	Área (km²)	População afetada (Habitantes)
Lden	>55	36.171	13.500
	>65	5.162	200
	>75	0.922	0
Lnight	>55	6.736	200
	>65	1.139	0
	>75	0.142	0

FONTE: adaptado de Ozkurt (2014).

A Figura 22 demonstra as curvas de ruído simuladas no *SoundPlan 7.1* para o ruído de 55 dB(A) nos anos de 2020, 2025 e 2030 no pior cenário ambiental possível, sendo possível verificar a diferença da abrangência de áreas afetadas e populações afetada na tabela 13.

FIGURA 22: MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO ANKARA ENSEBGA PARA A SITUAÇÃO FUTURA EM 2020, 2025 E 2030 NO PIOR CENÁRIO AMBIENTAL POSSÍVEL, PARA 55 DB(A).



FONTE: Ozkurt (2014).

TABELA 13: ESTIMATIVA DA ÁREA ACUMULADA E POPULAÇÃO AFETADA PARA O CENÁRIO FUTURO DE PIOR SITUAÇÃO AMBIENTAL POSSÍVEL.

Período	Faixa de ruído (dB(A))	Área (km <sup>2</sup> )			População afetada (habitantes)		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
Lden	>55	45.593	55.222	69.230	23.000	62.300	113.200
	>65	6.154	8.173	10.852	200	500	2.300
	>75	1.071	1.457	1.861	0	0	0
Lnight	>55	8.114	10.767	14.215	400	1.900	5.600
	>65	1.356	1.795	2.245	0	0	0
	>75	0.188	0.304	0.425	0	0	0

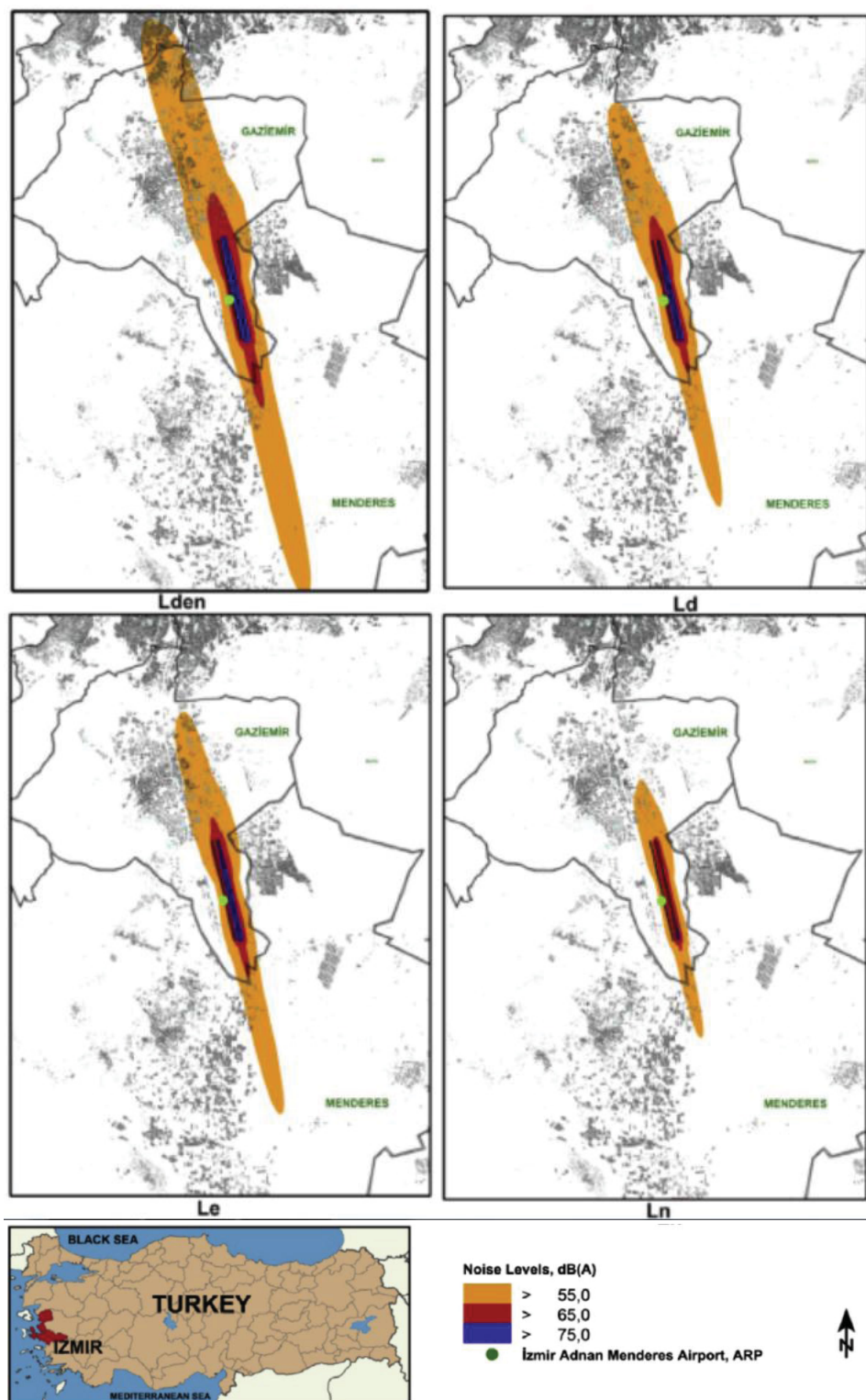
FONTE: Adaptado de Ozkurt (2014).

Através do seu trabalho científico, Ozkurt (2014) concluiu que, sendo o transporte aeroviário barato, rápido e confortável, a tendência no aumento do tráfego aéreo é alta, com isso, mais residências próximas ao aeroporto estarão expostas à poluição sonora gerada na atividade de aeronaves, necessitando que o aeroporto realize monitoramento contínuo do ruído e medidas compensatórias para o ruído excessivo.

Ozkurt et al. (2015) realizaram um estudo baseado na estimativa do ruído aeroviário em áreas sensíveis no entorno do aeroporto Izmir Adnan Menderes, Turquia. Para isso, os autores realizaram simulações computacionais no software *Soundplan 7.2* para as variáveis de pressão sonora *Lden*, *Lday*, *Levening* e *Lnight*, de acordo com a metodologia *ECAC doc.29*, conforme Diretiva Europeia de Ruído. Ozkurt et al. (2015) utilizaram malha na simulação de 50 em 50 metros para um raio de influência do ruído de 25 km. Os resultados do mapeamento acústico realizado pelo *Soundplan 7.2* podem ser observados na Figura 23:



FIGURA 23: MAPEAMENTO DE RUÍDO PARA *Lden*, *Lday*, *LEVENINGE* *LNIGHT* NO AEROPORTO IZMIR ADNAN MENDERES



FONTE: Ozkurt et al. (2015).

A partir do mapeamento acústico, Ozkurt et al. (2015) obtiveram a seguinte quantificação de áreas afetadas, conforme tabela 14:

TABELA 14: ESTIMATIVA DA ÁREA ACUMULADA E POPULAÇÃO AFETADA CONFORME O MAPEAMENTO ACÚSTICO NO AEROPORTO IZMIR ADNAN MENDERES.

Indicador	dB(A)	Área (km <sup>2</sup> )	Casas	População	Escolas	Hospitais
Lden	> 55	18.957	17.100	62.900	42	20
	> 65	2.963	200	400	0	0
	> 75	0.554	0	0	0	0
Lday	> 55	9.399	3.800	12.100	8	4
	> 65	1.695	0	0	0	0
	> 75	0.304	0	0	0	0
Levening	> 55	9.467	3.200	9.500	8	2
	> 65	1.590	0	0	0	0
	> 75	0.285	0	0	0	0
Lnight	> 55	4.190	600	1.100	0	0
	> 65	0.743	0	0	0	0
	> 75	0.007	0	0	0	0

FONTE: adaptado de Ozkurt et al (2015).

Ozkurt et al. (2015) indicam o limite permitido para o *Lday* de 68 dB(A), contemplando 400 pessoas e 200 casas afetadas pela poluição sonora causada pela operação de aeronaves no aeroporto Izmir Adnan Menderes e sugerem aos administradores do aeroporto políticas de mitigação de ruído e monitoramento contínuo.

Zannin et al. (2016) realizaram entrevistas com residentes do entorno do Aeroporto Bacacheri, Curitiba, a fim de verificar as reações causadas na população pelo ruído aeroviário. A entrevista envolveu uma amostra de 250 pessoas que vivem ou trabalham próximo ao aeroporto.

O resultado da entrevista indicou que 83 % dos entrevistados se questionam do ruído excessivo nos dias de semana, sendo que 36 % consideram o ruído aeroviário um fator determinante para dores de cabeça, 35 % dos entrevistados apresentam sintomas de irritabilidade e 29 % alegam ter insônia em função do ruído aeroviário. O resultado indicou maior incomodo na comunidade nos horários das 6 as 8 da manhã, em função do elevado tráfego neste horário. Em função disso, Zannin et al. (2016) realizaram a medição *in situ* em forma de *data logger* para verificar os valores dos níveis de pressão sonora durante os eventos aeronáuticos. A figura 24 mostra a ocorrência de quatro eventos aeroviários em um intervalo de 20 minutos no período citado, validando o resultado das entrevistas.

FONTE: Zannin et al. (2016).

Hamanci et al. (2017) estudaram o zoneamento de uso e ocupação do solo ao redor dos aeroportos internacionais da Turquia e analisaram paralelamente à poluição sonora gerada nos 4 aeroportos: Ankara Enseboga, Izmir Adnan Menderes, Antalya e Istambul Ataturk. Os autores utilizaram o *SoundPlan* para simulação das curvas de ruído. A análise consistiu em verificar a compatibilidade entre o zoneamento de uso e ocupação do solo com a poluição sonora gerada pelos aeroportos.

O estudo de Hamanci et al. (2017) contempla a utilização de um instrumento de gestão recomendado pelo ICAO para gestão e redução de ruído, na qual consiste na revisão e atualização do zoneamento aeroportuário cuja finalidade é a redução da exposição da população ao ruído aeroviário.

Esta seção teve como objetivo trazer uma linha do tempo das metodologias aplicadas no meio científico para avaliação e análise de ruído aeroviário, desde apenas questionários e/ou medições de parâmetros até a utilização de modelos matemáticos para confecção de mapas acústicos.

A tabela 15 indica um resumo das metodologias utilizadas na avaliação de ruído aeroviário:

TABELA 15: RESUMO GERAL DAS METODOLOGIAS APLICADAS PARA AVALIAÇÃO DE RUÍDO AEROVIÁRIO.

Autor/Ano	Metodologia				
	Questionário	Medição de parâmetros + N° de pontos		Mapeamento acústico	
				Software utilizado	Validação do modelo
Nunes (2005)	X	X	9	-	-
Neto (2010)	X	-	-	INM	-
Dinato (2011)	-	X	10	INM	-
Vogiatzis (2012)	-	X	8	CadnaA	-
Júnior e Garavelli (2012)	X	X	8	-	-
Bentes et al. (2013)	-	-	-	INM	-
Licitra et al. (2014)	-	-	-	INM	Sim
Sari et al. (2014)	-	X	4	SoundPlan 7.1	Sim
Ozkurt (2014)	-	X	4	SoundPlan 7.1	-
Ozkurt et al. (2015)	-	-	-	SoundPlan 7.2	-
Zannin et al. (2016)	X	X	1	-	-
Hamanci et al. (2017)	-	-	-	SoundPlan 7.2	-
Gerolymatou et al. (2019)	-	X	6	CadnaA	Sim
Tezel et al. (2019)	-	-	-	INM e Soundplan 7.2	-

FONTE: o autor (2019).

Diante da revisão acima, o presente trabalho tem como proposta criar e utilizar uma metodologia academico-científica que permita a avaliação, identificação e determinação de áreas afetadas pelo ruído aeroviário, envolvendo: a continuidade dos questionários aplicados por Zannin et al. (2016), a medição de parâmetros acústicos, caracterização do nível de pressão sonora por frequência no ruído aeroviário, simulação acústica, validação do modelo simulado e criação de cenários de redução de ruído.



## 6. METODOLOGIA

A presente seção tem como finalidade descrever os processos, os equipamentos utilizados e metodologias aplicadas para que os objetivos propostos fossem atingidos. O projeto foi dividido em duas etapas: coleta de dados e mapeamento acústico.

### 6.1 Coleta de dados

#### 6.1.1 Aeroporto Bacacheri

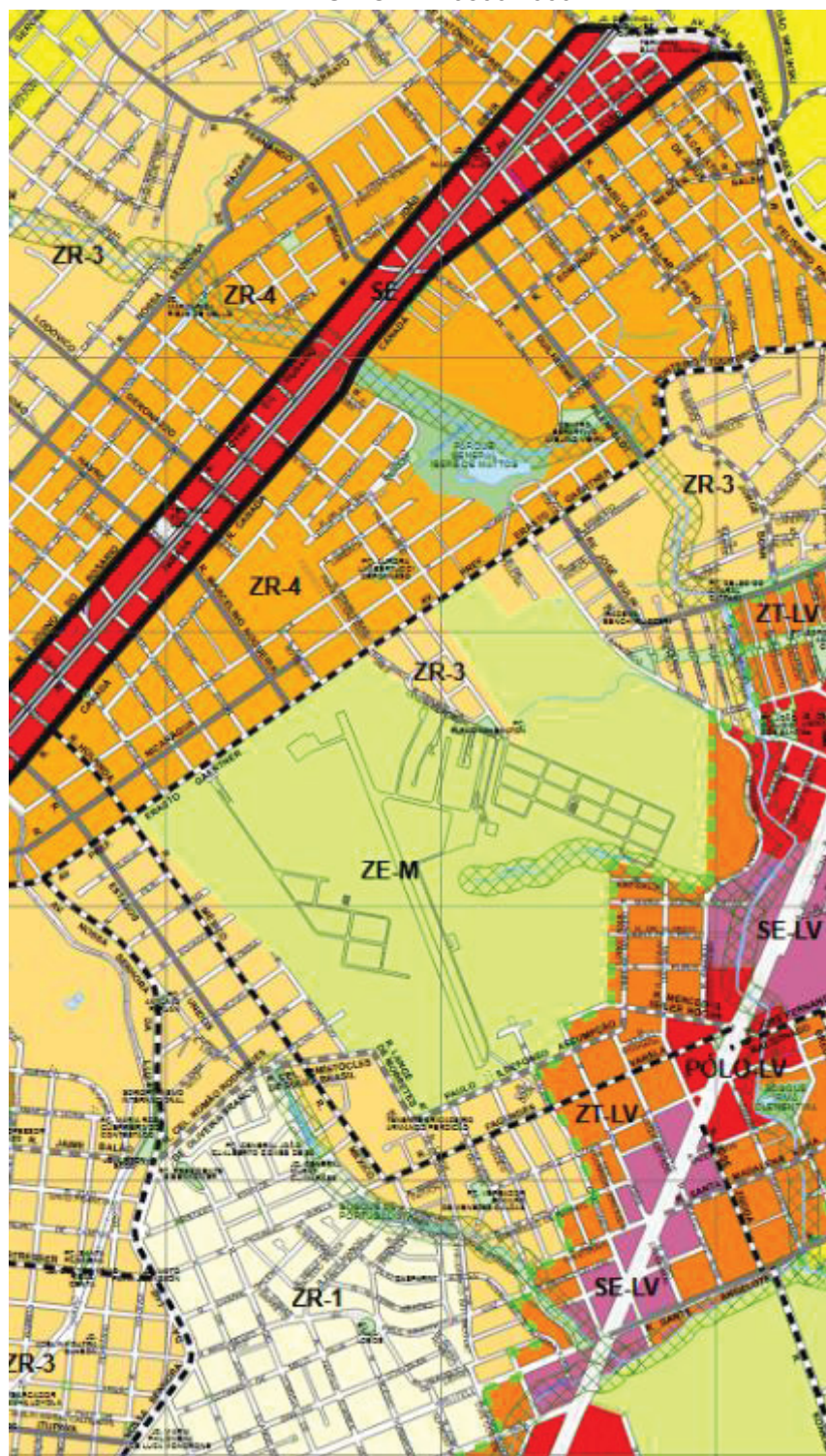
O Aeroporto Bacacheri (SBBI) está localizado na cidade de Curitiba, estado do Paraná, no bairro Bacacheri. É um aeroporto de porte pequeno-médio sendo utilizado principalmente para voos executivos de táxi aéreo, transporte de cargas e aero escola. Foi construído em 1930 para atender demandas da aviação militar; porém em 1980, a base área foi transferida para responsabilidade da Infraero, a fim de incentivar o desenvolvimento do aeroporto.

Localiza-se a aproximadamente 6 km do centro da cidade, rodeado por um bairro com predominância residencial, atividades de comércio e a vila militar. De acordo com o censo do IBGE (2010), o bairro Bacacheri possui em torno de 23.734 habitantes, uma área de 705 hectares, uma densidade demográfica de 33,37 habitantes por hectare e aproximadamente 2,60 habitantes por domicílio, os quais estão sujeitos ao ruído aeroviário gerado nas atividades aeroportuárias.

O aeroporto possui uma área que contempla 1.393.000 m<sup>2</sup>, com uma pista de pouso e decolagem com dimensões de 1.390 metros de comprimento com 30 metros de largura e com fluxo de passageiros estimado em 300 mil por ano.

De acordo com a Lei 9800/2000, que dispõe sobre o zoneamento urbano da cidade de Curitiba, o aeroporto está inserido na Zona Especial Militar (ZE-M). O zoneamento do aeroporto e suas comunidades anexas podem ser observados na Figura25:

FIGURA 25: ZONEAMENTO URBANO AO REDOR DO AEROPORTO BACACHERI CONFORME LEI MUNICIPAL 9800/2000.



FONTE: Lei 9800/2000 (2000).

Os limites de ruído permitido conforme a legislação municipal 16.625/2002 para as zonas ao redor do aeroporto podem ser observados na tabela 16:

TABELA 16: LIMITES DE RUÍDO CONFORME ZONEAMENTO AO REDOR DO AEROPORTO BACACHERI

Zona	Limite diurno (dB(A))
<b>ZR-1, ZR-2, ZR-3</b>	55
<b>ZE-M</b>	60
ZT-LV, SE-LV, ZR-4, SE	65

FONTE: adaptado da Lei 16.625/2002 (2002).

### 6.1.2 Quantificação do tráfego aéreo

A identificação dos tipos e modelos de aeronaves que operam no aeroporto foi realizada através do contato com a gerência do aeroporto e do Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA). Obteve-se o relatório do tráfego aéreo anual de 2018, sendo possível realizar a contagem total, o horário e o dia das operações e o modelo da respectiva aeronave.

A identificação e quantificação do tráfego aéreo são informações fundamentais para utilização como dados de entrada no modelo de mapeamento acústico ECAC.CEAC doc. 29. Os resultados da quantificação do fluxo podem ser observados na seção 7.1.

### 6.1.3 Modelos de aeronaves e tráfego aéreo

Após quantificação do tráfego de aeronaves e da identificação dos modelos que operam no Aeroporto Bacacheri, através do relatório anual do CINDACTA II, identificaram-se os seguintes modelos de aeronaves, identificadas pelo código ICAO e organizadas pelo tipo de partida e sua certificação de emissão de ruído.

A certificação de ruído determinada pelo ICAO está citada na seção 4.4 deste trabalho, na qual há a explicação e classificação de cada certificado. Os certificados de ruído são chamados de Capítulo, sendo os certificados capítulos 3 e 4 os mais recentes e adequados.

A identificação das aeronaves e classificação conforme seu certificado de ruído pode ser observado na tabela 17:

TABELA 17: MODELOS DE AERONAVES OPERANTES IDENTIFICADOS NO RELATÓRIO ANUAL, COM SEUS RESPECTIVOS CÓDIGOS E CLASSIFICAÇÕES POR EMISSÃO DE RUÍDO.

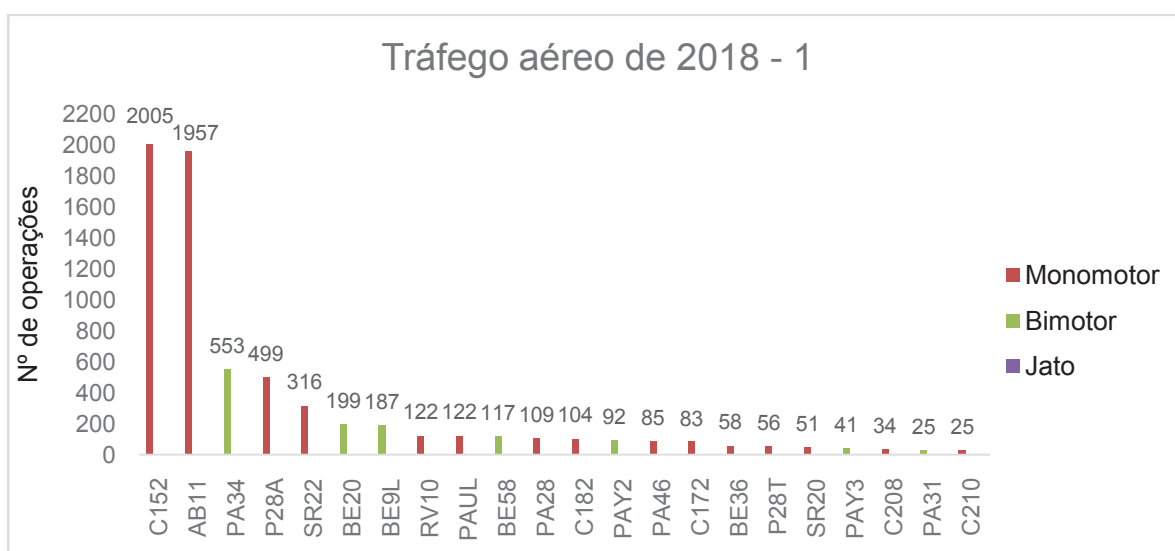
Motor de partida	Modelo (Código ICAO)	Certificação de ruído ICAO (Capítulo)
Monomotor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PA28;</li> <li>- SR22;</li> <li>- P28R;</li> <li>- CP10;</li> <li>- AB11;</li> <li>- C172;</li> <li>- C152;</li> <li>- RV10;</li> <li>- SR20;</li> <li>- C177;</li> <li>- C182;</li> <li>- BE36;</li> <li>- T6;</li> <li>- C210;</li> <li>- BE33;</li> <li>- C150;</li> <li>- P32R;</li> <li>- BL8;</li> <li>- C208;</li> <li>- P46T;</li> <li>- PA46;</li> <li>- PC12;</li> <li>- TBM7;</li> <li>- C206;</li> <li>- P28T.</li> </ul>	6 a 10.
Bimotor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- BE58;</li> <li>- BE55;</li> <li>- PA31;</li> <li>- PAY 1;</li> <li>- PAY 2;</li> <li>- PAY 3;</li> <li>- BE20;</li> <li>- PA34;</li> <li>- B350;</li> <li>- BE9L;</li> <li>- PAT4;</li> </ul>	6 a 10.
Jato	<ul style="list-style-type: none"> <li>- C525;</li> <li>- E50P;</li> <li>- C510;</li> <li>- LJ45;</li> <li>- E55P;</li> <li>- BE40;</li> <li>- C25A;</li> <li>- C25C;</li> <li>- C25B;</li> </ul>	3 4 4 4 4 2 4 4 4

FONTE: Autor (2019).

Através da tabela 17, percebe-se que, com exceção das aeronaves a jato, todas as aeronaves com ignição por monomotores e bimotores possuem certificação quanto à emissão de ruído defasada, sendo certificadas nos capítulos 6 a 10 pela certificação ICAO. Já as aeronaves a jato, mesmo sendo mais potentes que as monomotoras e bimotoras e justamente por este fator, apresentam boa certificação de redução de ruído na fonte. Destacam-se as aeronaves com certificação de ruído capítulos 3 e 4, apresentando menor emissão de ruído diante dos outros modelos.

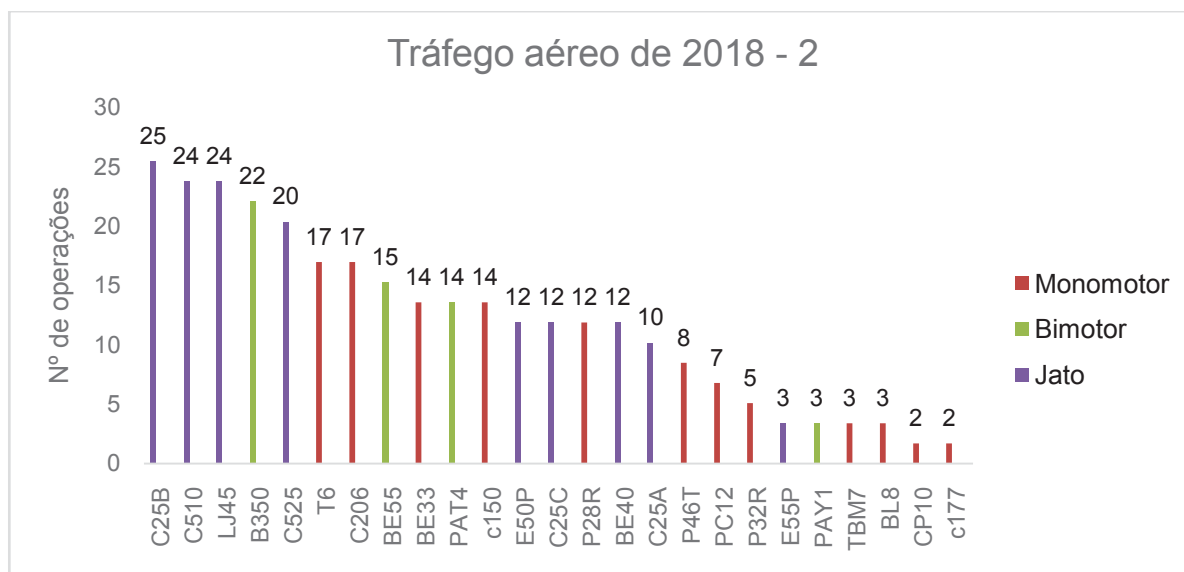
Relativo ao tráfego aéreo do aeroporto, os dados foram retirados do relatório anual de 2018, referente a 365 dias, totalizando 7.140 operações, sendo fundamental para dados de entrada nas simulações acústicas. A distribuição das operações por aeronave pode ser observada nas Figuras 26 e 27:

FIGURA 26: FLUXO AÉREO POR MODELO DE AERONAVES NO AEROPORTO – PARTE 1



FONTE: o autor (2019).

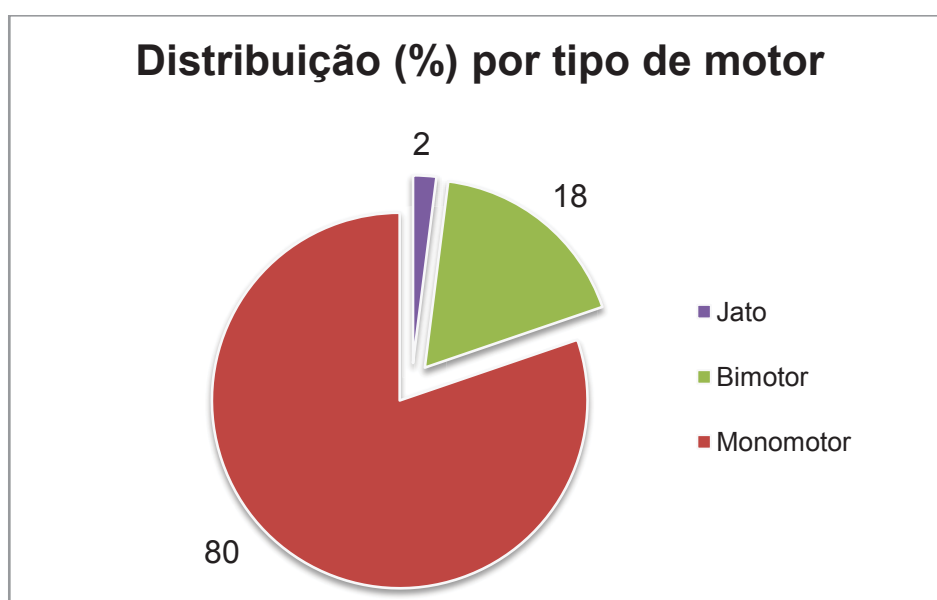
FIGURA 27: FLUXO ÁEREO POR MODELO DE AERONAVES NO AEROPORTO – PARTE 2



FONTE: o autor (2019).

Percebe-se, pela análise das Figuras acima, que fluxo aéreo predominante é correspondente às aeronaves monomotoras C172 e AB11, que contemplam 55 % do fluxo total. A distribuição total das aeronaves pelo tipo de motor pode ser observada na Figura 28:

FIGURA 28: DISTRIBUIÇÃO DO TOTAL DE OPERAÇÕES POR TIPO DE MOTOR



FONTE: o autor (2019).

O fluxo total de aeronaves no aeroporto, conforme Figura 38, é composto por 2 % por aeronaves a jato, 18 % por aeronaves bimotoras e 80 % por aeronaves

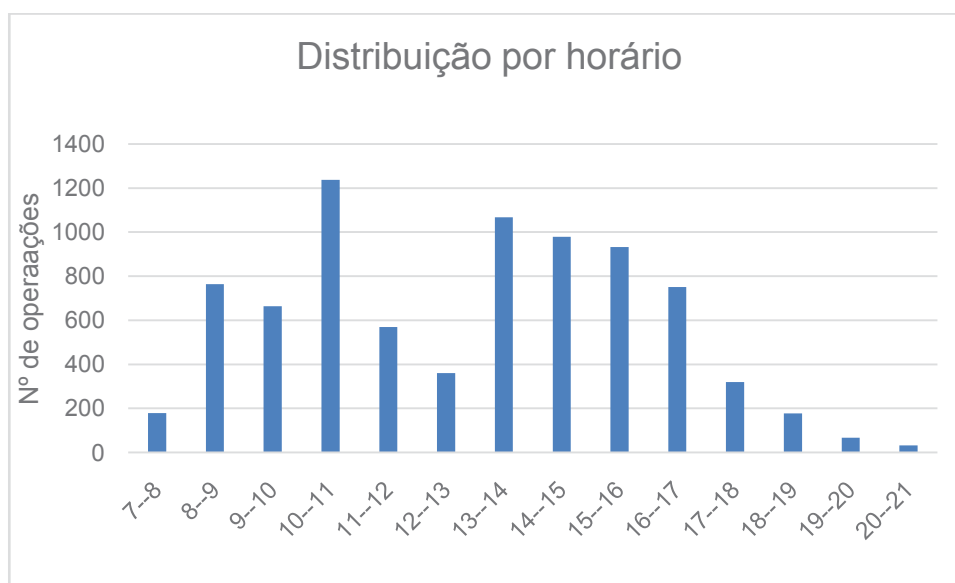


monomotoras. Apesar de o fluxo aéreo ser predominantemente composto de aeronaves monomotoras, cuja certificação de ruído é mais ruidosa, são aeronaves de pequeno porte e menor potência em relação às aeronaves bimotoras e a jato.

Através do relatório anual de tráfego aéreo do Aeroporto Bacacheri, retiraram-se informações referentes aos dias de operações e os horários de maior tráfego aéreo. Informação de suma importância para facilitar o cronograma de medições, possibilitando o maior registro de eventos de ruído aeroviário.

Na coleta dos dados foi possível identificar os horários de tráfego, resultando em um pico de movimento no intervalo entre as 10 horas e 11 horas da manhã, correspondente a uma contribuição de 15,3 % do tráfego total. Após, há um bom movimento entre 13 e 14 horas, correspondente a 13,2 %. O intervalo entre 14 e 15 horas, 15 e 16 horas, corresponde a 12,1 e 11,51 % do tráfego total, respectivamente, como pode ser observado na Figura 29 abaixo:

FIGURA 29: DISTRIBUIÇÃO DAS OPERAÇÕES POR HORÁRIO



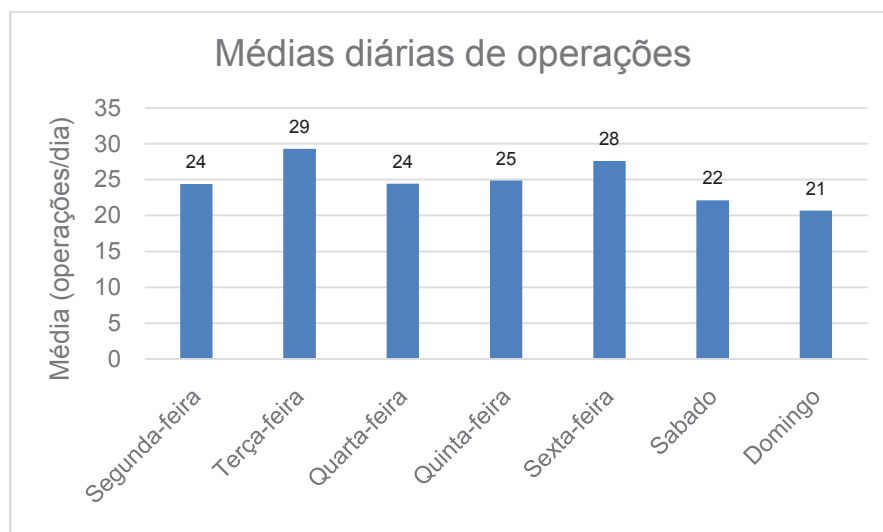
FONTE: o autor (2019).

Na Figura 29, é possível observar que no período vespertino, período contemplado entre 18 e 22 horas, ocorre uma redução acentuada do número de operações, contribuindo com 3,4 % do fluxo total. No período noturno ocorreram operações inferiores a 1 %, sendo desconsiderado por ser representativamente nulo.

Em relação aos dias de maior fluxo aéreo, através do relatório de tráfego anual, foi possível observar que o dia da semana com maiores operações é terça-feira, com uma média de 30 operações por dia, seguido da sexta-feira, com média

de 28 operações por dia. Os dados relativos às médias diárias de operações podem ser observados na Figura 30:

FIGURA 30: DISTRIBUIÇÃO DAS OPERAÇÕES POR HORÁRIO



FONTE: o autor (2019).

Destacam-se aqui que as operações de aeronaves são irregulares, tendo ocorrências de dias com nenhuma operação, como dias com número significativo de operações. As médias diárias e horárias obtidas acima foram usadas para identificar e facilitar a logística de medição em campo.

#### 6.1.4 Definição dos pontos de medição

De acordo com Sari et al. (2014), quanto mais distante o ponto de medição for da fonte de ruído aeroviário, o valor medido está sujeito à influência de outras fontes sonoras, como o ruído rodoviário, ferroviários e outros, reduzindo a confiabilidade da medição.

Em função disso, aliado ao fato do aeroporto Bacacheri ser considerado de pequeno a médio porte, com aeronaves do tipo monomotor, bimotor e baixo fluxo de aeronaves a jato, definiram-se os pontos de medição mais próximos a pista e com pouca influência de outros componentes do ruído ambiental. Desta maneira, foi possível realizar as medições, reduzindo o efeito de outros sons, podendo-se medir com maior segurança o som emitido pelas aeronaves.

Conforme Heleno et al. (2014), a métrica mais utilizada em aeroportos é a DNL, associada ao ruído gerado por período do dia (diurno e noturno), sendo o



Para manter a padronização das medições em campo, seguiram-se as recomendações conforme normas e leis citadas na seção 4.8.

FIGURA 31: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO AO REDOR DA PISTA DE OPERAÇÕES DO AEROPORTO BAGACHERI COM DEMARCAÇÃO DA ZONA DE SILÊNCIO.



### 6.1.5 Medição dos Níveis de Pressão Sonora, *datalogger* e análise de frequência

A medição dos níveis de pressão sonora e registro *datalogger* foram realizados através do equipamento Brüel & Kjaer modelo 2238; a análise dos componentes tonais do ruído (análise de frequência) foi realizada através dos analisadores sonoros Brüel & Kjaer modelo 2250 e modelo 2270. Anteriormente às medições dos níveis de pressão sonora, os analisadores foram calibrados pelo calibrador modelo Brüel & Kjaer 4231 a fim de garantir a precisão dos dados obtidos.

As medições foram realizadas durante o período diurno e seguiram as diretrizes das normas NBR 10.151/19, NBR 13.368/95 e ISO 3891, que estabelecem as condições climáticas adequadas, o tempo mínimo de medição de 1 hora para ruído aeroviário, altura do microfone de 1,2 metros do solo e 2 metros de distância de superfícies refletoras, a fim de manter a padronização e homogeneidade nos dados. Os pontos medidos foram anotados em uma planilha, conforme Figura 32:

FIGURA 32: PLANILHA PARA COLETA DOS DADOS MEDIDOS.

Ponto:		Data:		
Início:		Fim:		Equipamento:
Condições meteorológicas:				
Coordenadas:		L <sub>Aeq</sub> (dB):		
<b>Contagem de aeronaves:</b>				
Horário do evento:		Horário do evento:		
Tipo da aeronave:		Tipo da aeronave:		
Horário do evento:		Horário do evento:		
Tipo da aeronave:		Tipo da aeronave:		
Horário do evento:		Horário do evento:		
Tipo da aeronave:		Tipo da aeronave:		

FONTE: o autor (2018).

Após a medição nos pontos citados, os dados foram transferidos dos equipamentos para os computadores pelo software *Noise Explorer* modelo 7815 para posterior análise dos dados. As Figuras 33, 34 e 35 demonstram as medições realizadas nos pontos 1, 2 e 3:

FIGURA 33: MEDIÇÃO DE LAeq PRÓXIMO A CABECEIRA 18 – PONTO 1 - ARROWJET



FONTE: o autor (2019).

FIGURA 34: MEDIÇÃO DE LAeq NO TERMINAL AEROPORTO – PONTO 2



FONTE: o autor (2019).



FIGURA 35: MEDIÇÃO DE LAeq PRÓXIMO A CABECEIRA 36 DA PISTA - PONTO 3



FONTE: o autor (2019).

A medição das componentes tonais do ruído aeroviário foi realizada no ponto 3 em função da proximidade da cabeceira 36 da pista de decolagem para caracterização com menor influência de outros tipos de ruído durante o período de 2 horas. As Figuras 36 e 37 ilustram a medição *in situ*:

FIGURA 36: MEDIÇÃO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA NO PONTO 3 – COM AERONAVE BIMOTORA



FONTE: o autor (2019).

FIGURA 37: MEDIÇÃO DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA NO PONTO 3 – COM AERONAVE MONOMOTORA



FONTE: o autor (2019).

## 6.2 Mapeamentos acústicos

Para o mapeamento acústico do ruído aeroviário no Aeroporto Bacacheri foi utilizado *software SoundPlan 8.0*, disponível no Laboratório de Acústica Ambiental – Industrial e Conforto Acústico (LAAICA) da Universidade Federal do Paraná.

No *SoundPlan 8.0*, foi utilizado o módulo *Aircraft Noise*. O modelo baseia-se no princípio físico da propagação de ondas sonoras no meio através de modelos matemáticos que simulam a emissão, propagação e interação de sons oriundos de aeronaves com fatores ambientais que alterem a propagação.

A simulação acústica foi dividida em duas etapas: pré-processamento e cálculo do ruído. A etapa de pré-processamento consiste na preparação do modelo, envolvendo a inserção dos dados de entrada como: topografia, tráfego aéreo e elementos ambientais. Já a etapa de cálculo do ruído consiste no ajuste final para o cálculo do mapeamento acústico, envolvendo a definição do modelo de cálculo e a malha de espaçamento.

A criação do cenário de interesse é um processo de construção que demanda tempo e paciência, em função da necessidade de ações manuais para construção do mesmo para uma grande área de interesse. Para uma boa execução do modelo computacional, devem-se seguir adequadamente algumas etapas sequenciais, como:

- I) Inserção dos pontos altimétricos e/ou curvas de nível georreferenciadas para criação da superfície do local de interesse;
- II) Inserção georreferenciada das imagens de satélite para digitalização dos elementos ambientais como rodovias, edificações, vegetação, corpos hídricos etc.;
- III) Digitalização das edificações: desenho manual das edificações em 2D e inserção da altura do empreendimento para 3D;
- IV) Digitalização das rodovias e vegetação;
- V) Criação do elemento aeroporto e pistas de operações;
- VI) Inserção do tráfego aéreo por período do dia, considerando todas as aeronaves que operaram no ano após correta identificação e quantificação;

As etapas seguidas para o mapeamento acústico são descritas na Figura 38



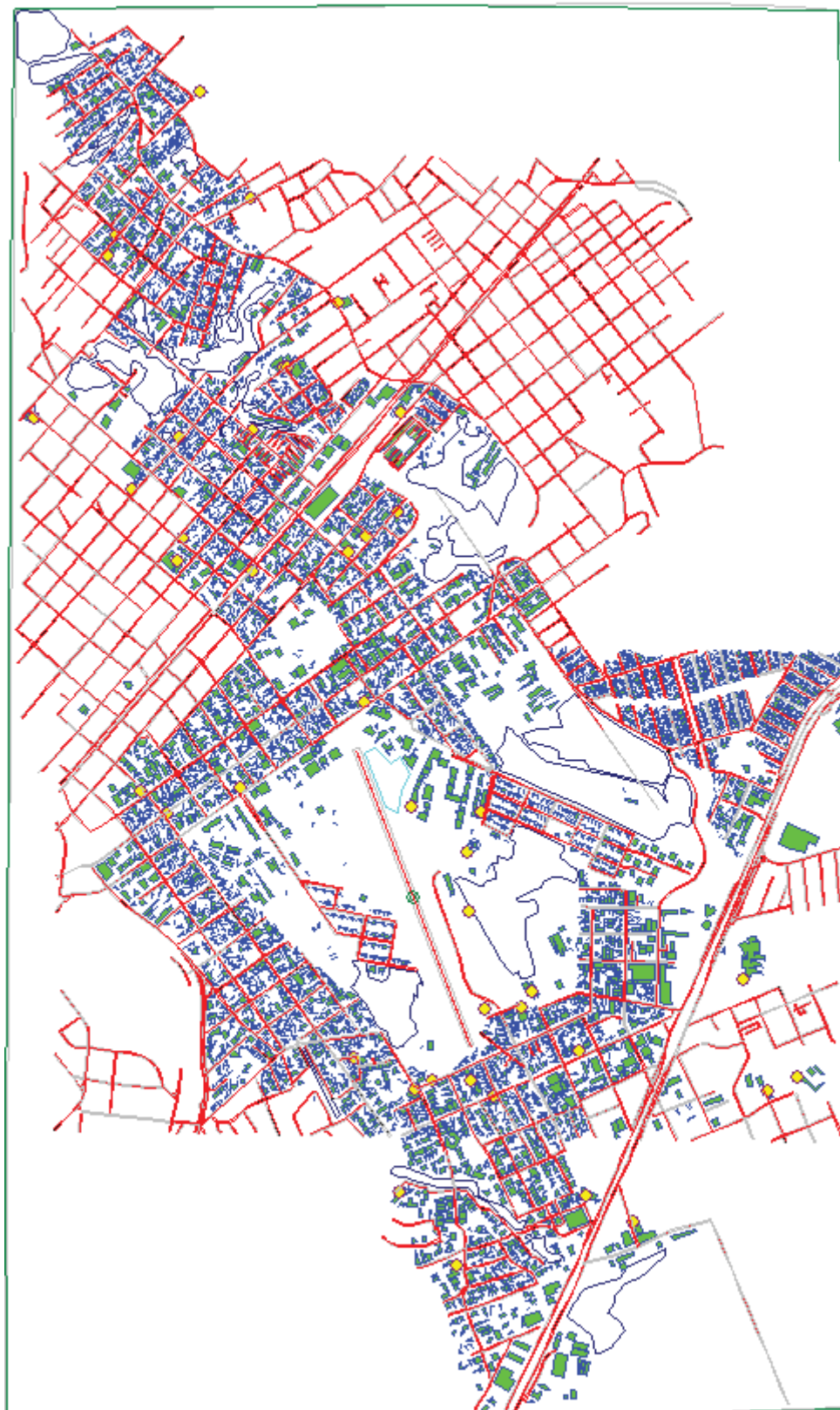
FIGURA 38: SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO MAPEAMENTO ACÚSTICO NO SOUNDPLAN.



FONTE: o autor (2019).

O resultado da etapa de pré-processamento pode ser observado nas Figuras 39 e 40:

FIGURA 39: MODELO DIGITALIZADO DO AEROPORTO BACACHERI NO *SOUNDPLAN 8.0*



FONTE: o autor (2019).



FIGURA 40: VISTA DA ÁREA DO AEROPORTO BACACHERI EM 3D NO SOUNDPLAN 8.0



FONTE: o autor (2019).

Após a inserção dos dados de entrada, definiu-se o modelo de cálculo utilizado para o mapeamento do ruído aeroviário: ECAC doc. 29, criado em 1997 pela Conferência Europeia de Aviação Civil, na França. O modelo ECAC doc. 29 é um modelo amplamente utilizado para confecção de mapas de ruído aeroviário na Europa (HAMAMCI et al., 2017; OZKURT et al., 2015; OZKURT, 2014; SARI et al., 2014; VOGIATZIS, 2012).

A malha de cálculo, recomendada pela ECAC, corresponde a 2 mm no mapa que será gerado as linhas de ruído, isto é, malha de 200 m para escala de 1:100.000, 100 m para escala de 1:50.000 e 50 m para escala de 1:25.000. O mapa em questão tem escala de 1:30.332 e a malha mínima deve ser de 60 m por 60 m. Entretanto, para melhor precisão dos dados simulados, o modelo foi simulado com malha de 2 x 2 m. Com essa malha de cálculo, o modelo simulou 15.166 pontos. Após a simulação da situação acústica atual do aeroporto, simularam-se mais 2 cenários para mitigação do ruído do aeroporto.

### 6.3 Validação do modelo

O processo de validação do modelo consiste numa etapa fundamental no mapeamento acústico. A validação tem como função básica dar validade ao modelo matemático através da comparação com valores medidos do fenómeno natural de interesse. Primeiramente, o software realiza uma inspeção automática interna nos elementos de entrada do modelo a fim de verificar se há inconsistências que possam dificultar ou impossibilitar a realização da simulação computacional.

Após a simulação realizada pelo software, compararam-se os valores simulados com os valores medidos em campo para dar suporte e validade ao trabalho computacional. A comparação é feita através da inserção de pontos receptores no modelo os quais indicam o valor do nível de pressão sonora calculada naquele ponto, devendo ser comparado com o valor medido naquele ponto no local. A validação científica de modelos de ruído aeroviário possui algumas lacunas a serem preenchidas, devido à falta de dados confiáveis e a complexidade em torno das incertezas dos modelos matemáticos (FILIPPONE, 2014; AUSEJO et al., 2010).

Entretanto, a Agência Portuguesa do Ambiente (2011) sugere que a diferença entre o valor simulado e o obtido em campo seja de até  $\pm 2$  dB(A).

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

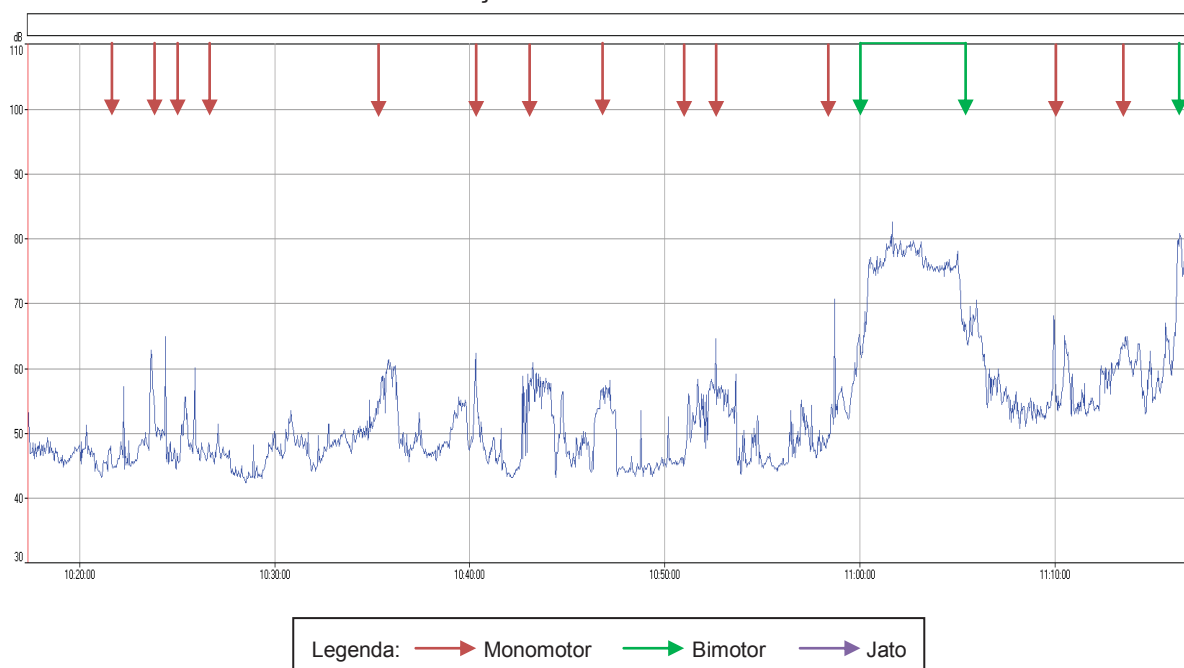
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas medições *in situ* e nas simulações acústicas.

### 7.1 Medições dos Níveis de Pressão Sonora

As medições dos níveis de pressão sonora nos pontos definidos na metodologia realizaram-se conforme padronizações citadas nos itens 4.8.2, 4.8.3 e 4.8.4 e os locais dos pontos de medição podem ser observados na figura 26, no capítulo 6.1. As medições tiveram duração de 1 hora, conforme NBR 13.368/95

A medição no ponto 1 pode ser observada na Figura 41, contendo o registro do LAeq em dB(A). No eixo vertical e no eixo horizontal, tem-se o tempo de medição, correspondente a 1 hora.

FIGURA 41: REGISTRO DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 1



FONTE: o autor (2019).

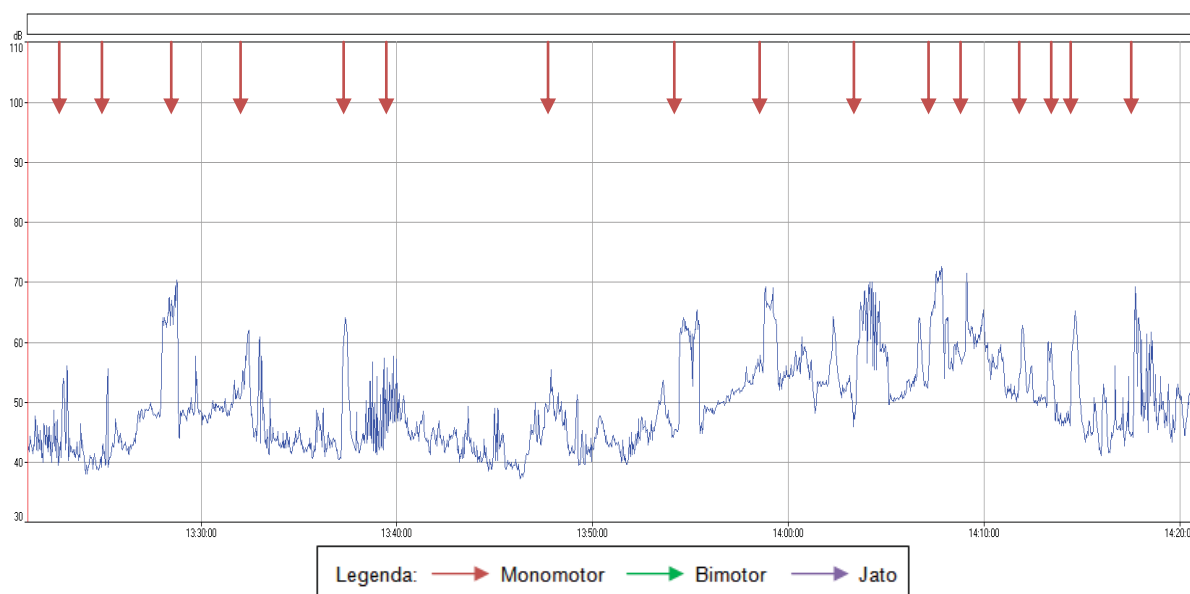
Percebem-se, na Figura 41, picos de pressão sonora em intervalos distintos, sendo todos os picos relacionados à operação de aeronaves. Os picos de pressão sonora oriundos da atividade aeroviária variam de 58 dB(A) a 82,6 dB(A), indicando níveis altos de poluição sonora. Destaca-se a diferença entre os picos de pressão sonora oriundos de aeronaves monomotoras e bimotoras, na qual o maior valor

atingido em monomotoras foi de 70 dB(A) enquanto para a aeronaves bimotoras o menor valor medido foi de 76 dB(A).

No ponto 1, o valor máximo do nível de pressão sonora (LA<sub>max</sub>) medido foi de 93,1 dB(A) e o valor de LA<sub>eq</sub> de todo o registro é de 67 dB(A), valor acima do permitido pela legislação municipal conforme zoneamento urbano, de 60 dB(A).

A Figura 42 indica o registro do LA<sub>eq</sub> no ponto 2. Neste ponto, registraram-se picos de LA<sub>eq</sub> variando de 52 dB(A) a 73 dB(A), sendo todos os picos relacionados a operação de aeronaves monomotoras.

FIGURA 42: DATALOGGER DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 2

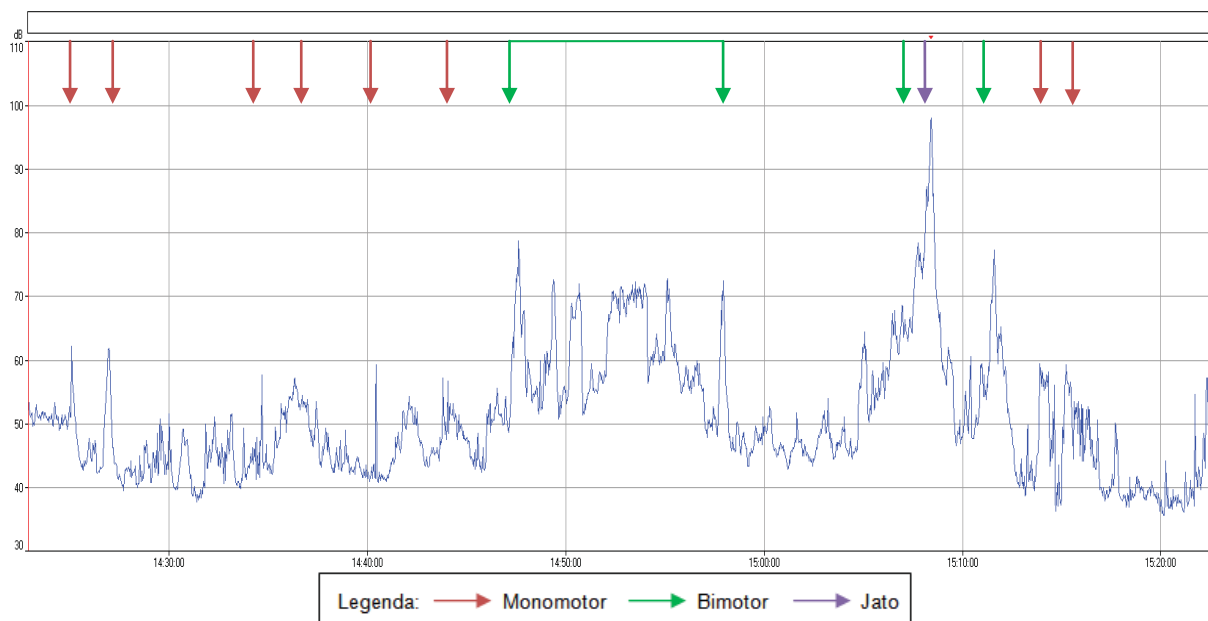


FONTE: o autor (2019).

Nesta medição, o LA<sub>eq</sub> do período medido foi igual a 57 dB(A) enquanto o LA<sub>max</sub> foi de 77 dB(A). O valor medido enquadra-se na legislação municipal de ruído conforme o zoneamento específico em que se situa, entretanto, o ponto está inserido no raio de 200 m ao redor de escolas e hospitais, estando a poluição sonora acima do permitido em 2 dB(A).

No ponto 3, foram realizadas duas medições devido ao ambiente ser predominante pelo ruído aeroviário. A primeira medição no ponto 3, denominada de ponto 3.a, como pode ser visto na Figura 43, registraram-se picos de LA<sub>eq</sub> variando de 58 dB(A) a 98 dB(A), com um LA<sub>max</sub> de 102,3 dB(A). Nesta medição, obteve-se o registro das aeronaves monomotoras, bimotoras e a jato.

FIGURA 43: DATALOGGER DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 3.a



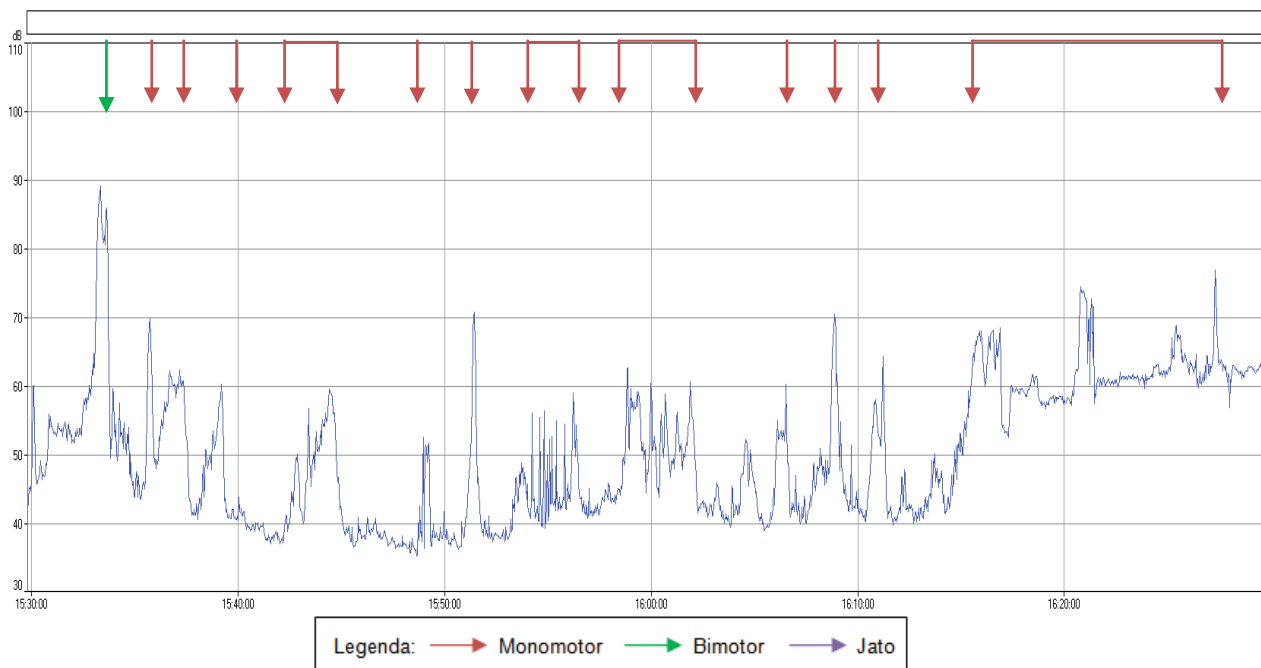
FONTE: o autor (2019).

Na Figura 43 acima, destaca-se a operação de uma aeronave a jato, atingindo o valor de LAeq de 98 dB(A). Para operação de aeronaves bimotoras, picos de LAeq de 71 a 78 dB(A) e para as aeronaves monomotoras registrou-se picos de 58 dB(A) a 62 dB(A), com LAeq do período de 71,1 dB(A).

Ainda no ponto 3, na segunda medição, denominada de 3.b, realizou-se uma segunda medição pois é um local muito próximo da cabeceira com baixo ruído de fundo. Analisando o *registro* do ponto 3.1, a segunda medição, representada na Figura 44, mostra o um pico de LAeq expressivo, oriundo da operação de uma aeronave bimotora, com valor de 89 dB(A). Observa-se também o registro dos picos de LAeq oriundos de aeronaves monomotoras, com variação de 52 a 76 dB(A). Exalta-se, novamente, a grande diferença entre os picos registrados de monomotoras e bimotoras, de aproximadamente 13 dB(A).

Durante o período total da medição, o LAeq foi de 71 dB(A) e registrou-se o LAmax igual a 91 dB(A), com origem na subida da aeronave bimotora. Neste ponto de medição, o limite permitido é restrito a 55 dB(A), pois encontra-se inserido no raio de 200 m ao redor de escolas, indicando que o ruído se encontra irregular diante da legislação.

FIGURA 44: DATALOGGER DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 3.b



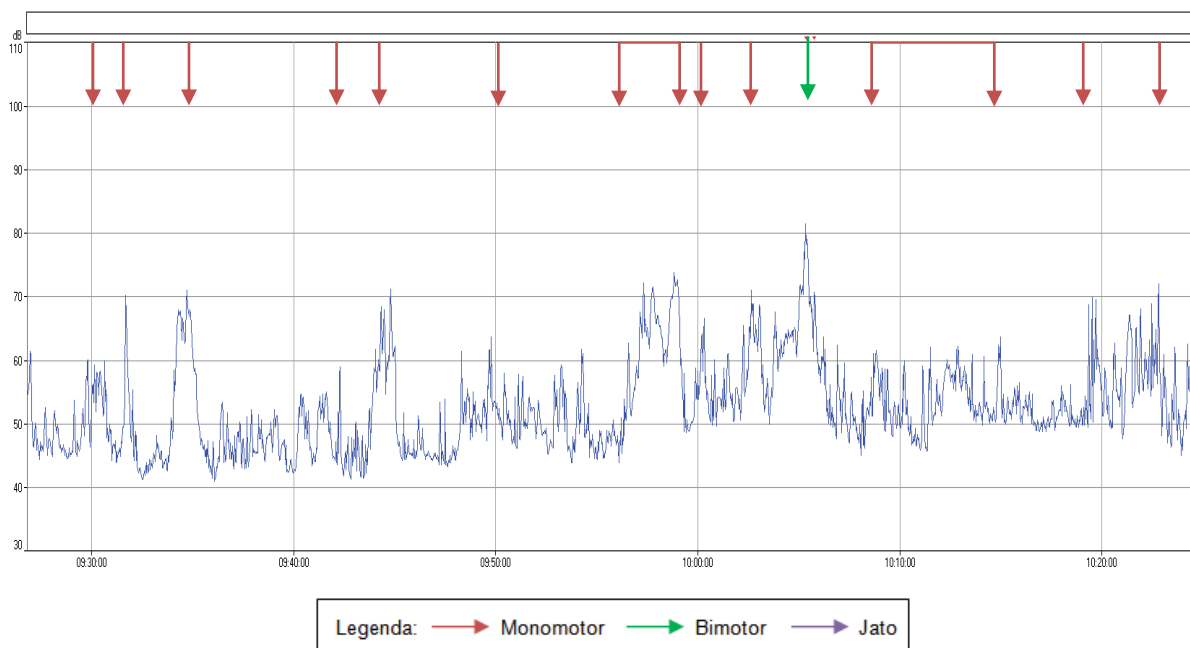
FONTE: o autor (2019).

Observa-se que o ponto 3 está inserido no raio de 200 m próximo a uma escola, sendo uma área mais restrita ao ruído, com limite de 55 dB(A). Nos períodos totais das medições, os valores de LAeq medidos foram iguais a 71,1 dB(A) e 71 dB(A), para os pontos 3.a e 3.b respectivamente, valor acima do permitido pela legislação municipal.

A medição no ponto 4, indicada na Figura 45, demonstra diversos picos de LAeq oriundos de aeronaves monomotoras, com valores na faixa de 58 dB(A) a 73 dB(A); destaca-se o evento registrado correspondente a uma aeronave bimotora, com valor do pico de LAeq igual a 82 dB(A). Durante o período total da medição o valor de L<sub>Amax</sub> medido foi de 86 dB(A) e o valor de LAeq do período medido igual a 60 dB(A), de acordo com a legislação municipal.



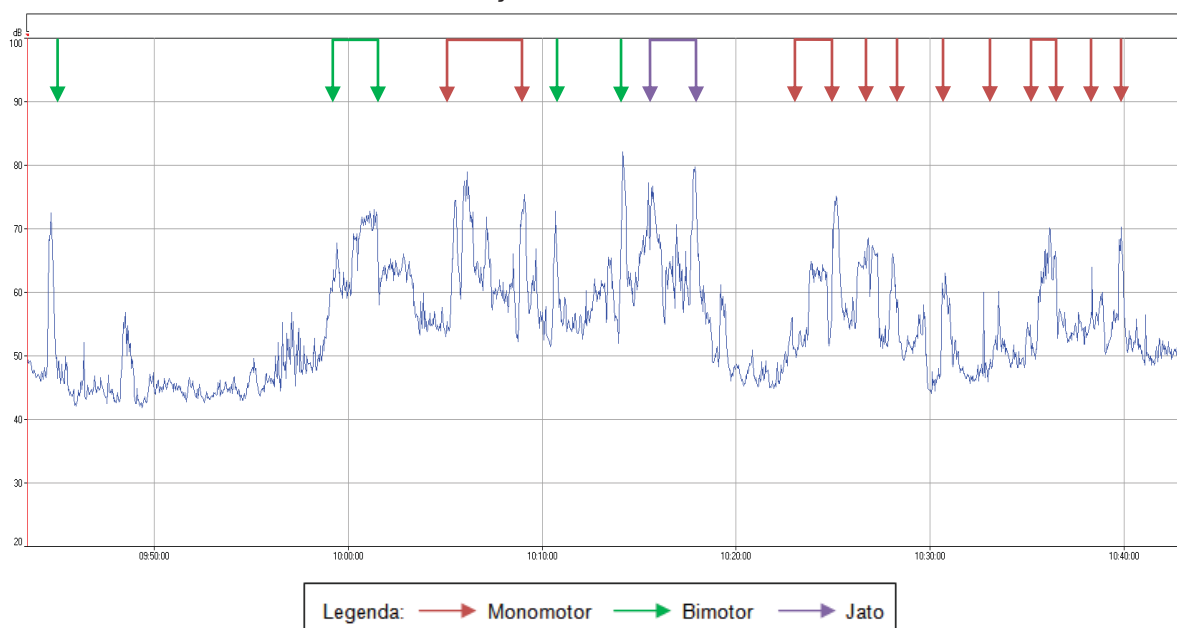
FIGURA 45: DATALOGGER DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 4



FONTE: o autor (2019).

Durante a medição no ponto 5, indicado na Figura 46, observou-se a presença de picos de LAeq com origem na atividade de aeronaves a jato, bimotoras e monomotoras. Durante o período da medição, registrou-se LAeq de 63,6 dB(A) e um valor máximo (LAmáx) de 85,6 dB(A). Neta medição, destaca-se a ocorrência de um período sem operação de aeronaves, contemplando apenas o ruído de fundo, equivalente a 45 dB(A).

FIGURA 46: DATALOGGER DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO PONTO 5



FONTE: o autor (2019).



Na Figura 46, pode-se perceber intensos picos de LAeq, com distintas variações para a operação de aeronaves monomotoras, variando de 58 a 77 dB(A), aeronaves bimotoras, variando de 72 dB(A) a 82 dB(A) e aeronaves de turbina a jato, variando de 71 a 79 dB(A). Pode-se perceber que as aeronaves a jato e bimotoras possuem um maior valor de poluição sonora.

Seguindo a avaliação da NBR 13.368/1995, todos os picos de LAeq oriundos da operação de quaisquer aeronaves registrados ultrapassam a diferença de 3 dB(A) do ruído de fundo, caracterizando o ruído aeroviário como causador de impacto significativo a comunidade anexa ao aeroporto.

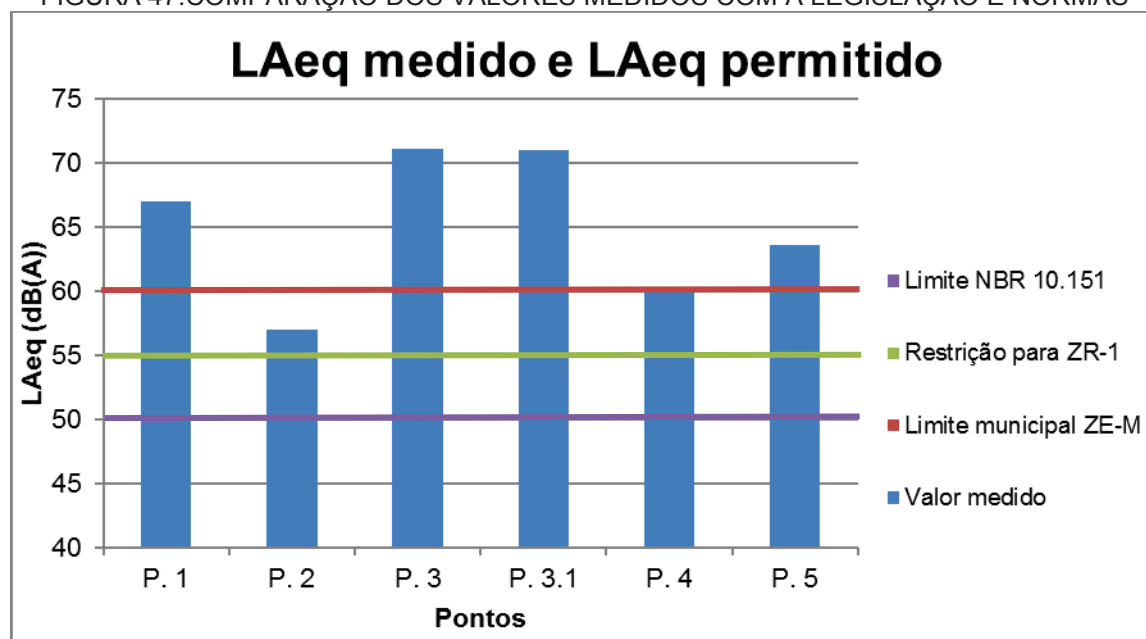
A tabela 18 compara os valores de LAeq medidos nos respectivos pontos com os valores permitidos pela lei municipal 16.625/02, com a restrição específica para zonas com hospitais e escolas e com o critério de avaliação disposto na NBR 10.151/19. A Figura 47 ilustra didaticamente a comparação:

TABELA 18: COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS COM A LEGISLAÇÃO EM DB(A).

Ponto	Valor medido	Limite municipal – lei 16.625/02 ZE-M	Restrição para zona de silêncio ZR-1	Critério NBR 10.151/19
1	67	60	Não aplicável	60
2	57	60	55	50
3.a	71,1	60	55	50
3.b	71	60	55	50
4	60	60	Não aplicável	60
5	63,6	60	55	50

FONTE: o autor (2019).

FIGURA 47: COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS COM A LEGISLAÇÃO E NORMAS



FONTE: o autor (2019).

Dos 6 pontos medidos, somente os pontos 1 e 4 não se enquadram nas zonas de silêncio pela presença de pontos sensíveis, comparando-os somente com a legislação de ruído por zoneamento, onde apenas o ponto 4 está adequado aos 60 dB(A) permitidos. Em suma, os pontos 2, 3 e 5, inseridos na zona ZR-1, apresentam valores acima do permitido tanto para a legislação municipal quanto ao critério de conforto acústico de áreas habitadas da NBR 10.151/19.

Importante ressaltar que a NBR 10.151/2019 não possui caráter legal e de regulamentação, mas sim de recomendação técnica para a avaliação acústica de áreas habitadas.

Comparativamente ao presente projeto, os pesquisadores Osagie et al. (2018) e Salama et al. (2016) e Ozkurt (2014) realizaram medições de LAeq próximo a aeroportos com maior tráfego aéreo e estrutura para maiores aeronaves em relação ao Aeroporto Bacacheri. Os estudos apresentaram valores medidos de LAeq semelhantes aos obtidos neste projeto, variando de 71 a 90 dB(A), 65 a 97 dB(A) e 50 a 71 dB(A), para os respectivos autores, que concluíram que as comunidades nos entornos dos respectivos aeroportos estão poluídas acusticamente tal qual o entorno do Aeroporto Bacacheri.

## 7.2 Análise do Espectro de Frequência

A medição dos componentes tonais de 1/3 da oitava foi realizada no período de 2 horas no ponto 3. Durante o período de medição, registraram-se 16 operações de aeronaves, entre elas 10 operações de aeronaves monomotoras, 5 operações de aeronaves bimotoras e uma operação de aeronave a jato.

Os valores totais de LAeq, LAmin e LAmax medidos no período da medição podem ser observados na tabela 19:

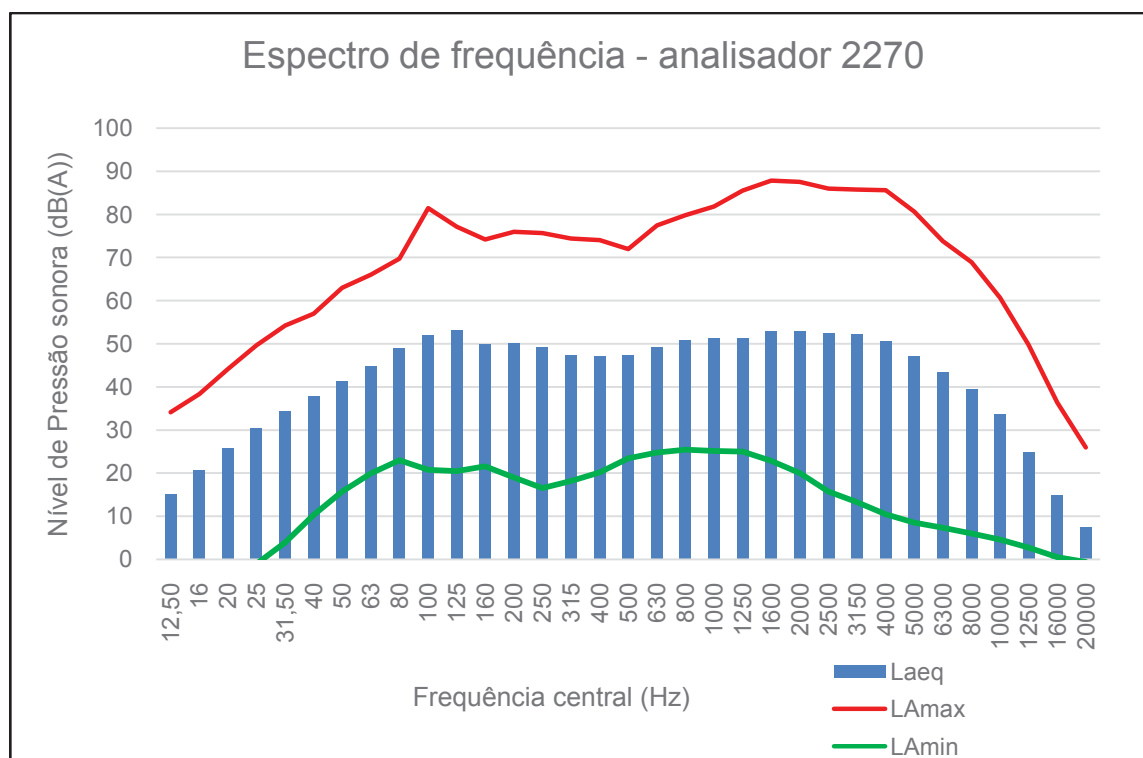
TABELA 19: VALORES GLOBAIS DE LAEQ, LAMAX E LAMIN OBTIDOS NA MEDIÇÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA.

Analizador sonoro	LAeq (dB(A))	LAmax (dB(A))	LAmin (dB(A))
B&K 2270	63,7	94,5	38,2

FONTE: o autor (2019).

Já o espectro de frequência ou as componentes tonais de 1/3 da oitava do ruído aeroviário obtidas em campo pode ser observado na Figura 48.

FIGURA 48: ESPECTRTO DE FREQUÊNCIA OBTIDA PELO ANALISADOR SONORO B&K 2270



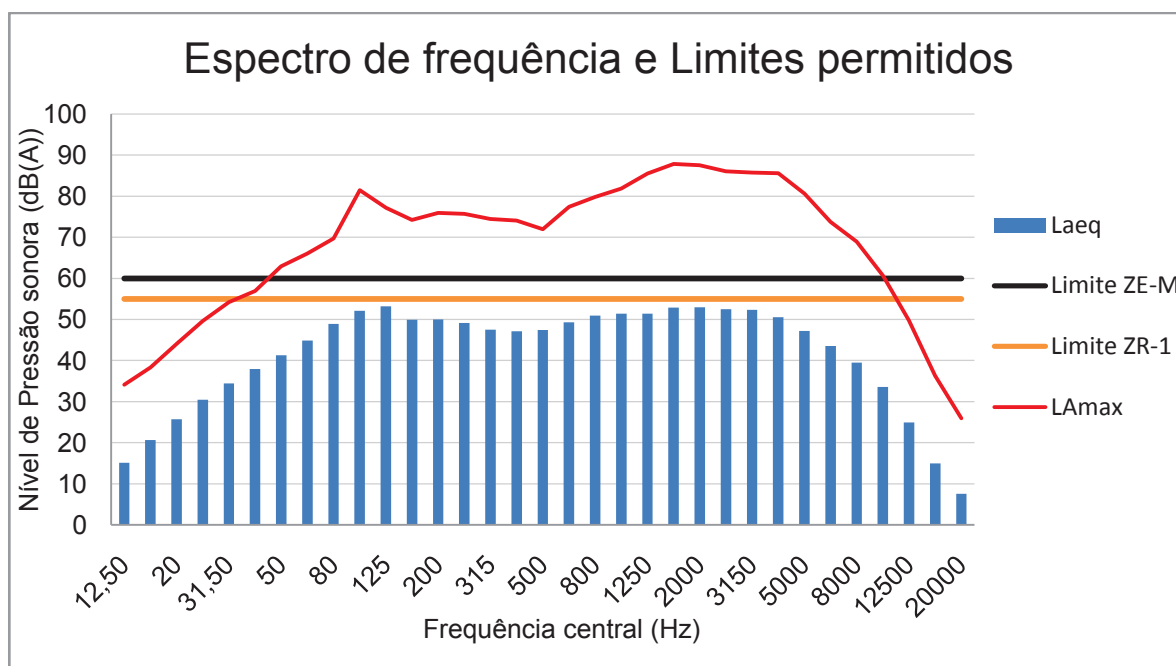
FONTE: o autor (2019).

Percebe-se através dos gráficos acima que os resultados dos níveis de pressão sonora de L<sub>Amax</sub> obtidos entre as frequências de 50 Hz e 10 kHz, apresentam valores acima de 60 dB(A). Destacam-se as frequências centrais de 100 Hz e 800 Hz a 5.000 Hz, que apresentam valores de L<sub>Amax</sub> maiores ou iguais a 80 dB(A). Por outro lado, os maiores valores de L<sub>Aeq</sub> obtidos foram para as frequência de 125 Hz, equivalente a 53,1 dB(A) e 100 Hz com 52 dB(A).

Ao analisar a Figura 49 e a tabela 19, percebe-se que os valores de L<sub>Aeq</sub> obtidos para cada componente tonal estão adequados aos valores permitidos. Entretanto, ao considerar o L<sub>Aeq</sub> global da medição, percebe-se que há poluição sonora no ambiente. Todavia, os valores de L<sub>Amax</sub> obtidos para a frequência de 50 Hz até 10.000 Hz encontram-se acima do permitido.

Destaca-se que, para o local do ponto de medição, ponto 3, considera-se o zoneamento como zona de silêncio, com limite para ZR-1 equivalente a 55 dB(A). A Figura 49 compara os valores do espectro de frequência para ambos os analisadores com os limites permitidos para o zoneamento ZE-M e ZR-1.

FIGURA 49: ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DOS DOIS ANALISADORES SONOROS COMPARADOS COM A LEGISLAÇÃO.



FONTE: o autor (2019).

Filippone (2014) realizou a análise do espectro de frequências para os eventos isolados de decolagem e aterrissagem de uma aeronave bimotora e verificou picos elevados dos níveis de pressão sonora para as frequências baixas, entre 63 e 250 Hz.

De acordo com o ICAO (2007), os motores de partida das aeronaves possuem partes isoladas que contribuem com frequências distintas para o espectro sonoro total. Os valores mais elevados de pressão sonora, nas altas frequências de 4 kHz e 5 kHz, originam-se na decolagem de aeronaves cuja partida é através de motores a jato, especificamente na turbina e compressor. Para as baixas frequências até 250 Hz, o ruído origina-se principalmente na combustão e na eliminação do combustível no ar (WAYE, 2011).

Os receptores expostos mesmo a baixas pressões sonoras em baixas frequências já estão sujeitos aos impactos negativos, destacando-se a perda parcial de audição, dores de cabeça, irritabilidade, distúrbios no sono e insônia, redução de desempenho profissional e, indiretamente, a alteração social comportamental (WAYE, 2011; STORM, 2009).

Torija et al (2019) estudaram a resposta da população exposta ao ruído aeroviário através da análise das componentes tonais de 6 turbinas com espectro de frequência distintas, concluindo que o tom agudo de altas frequências como o fator determinante às respostas ao ruído aeroviário. Aliado a isto, Alimohammad e Ebrahimi (2017) comentam que a exposição a altas frequências é mais incômoda em relação a baixas frequências, criando dificuldades no entendimento da fala e náuseas.

### 7.3 Simulações acústicas

#### 7.3.1 Validação do Modelo

Para validar a simulação acústica, foram comparados os valores simulados no modelo com os valores obtidos nas medições de campo. Desta forma, foi possível verificar se o mapeamento acústico está o mais próximo possível da situação acústica real. Este procedimento é importante, pois de acordo com Ausejo et al. (2010), a incerteza de mapas de ruído pode ser oriunda das medições em campo, método do cálculo e programação de cálculo do software. Quando o modelo e a medição apresentam valores distintos, devem-se calibrar parâmetros do modelo para aproximar ao máximo da situação ambiental real. A validação do modelo pode ser observada na tabela 20:

TABELA 20: DIFERENÇA DOS VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DE CAMPO COM OS VALORES SIMULADOS NO MODELO

Ponto	Valor medido (dB(A))	Valor simulado (dB(A))	Diferença entre medidos e simulados (dB(A))
1	67	66,2	0,7
2	57	58,8	-1,8
3.a	71,1	69,3	1,8
3.b	71	69,3	1,7
4	60	62,5	-2,5
5	63,6	64,2	-0,6

FONTE: o autor (2019).

Como pode ser observado na tabela acima, para o modelo utilizado, a diferença máxima em 6 pontos simulados e medidos é de -2,5 dB(A), no ponto 4. Sari et al. (2014) encontraram diferença máxima entre pontos simulados e medidos de 7 dB(A) para o ponto mais distante da pista, já Licitra et al. (2014) encontraram diferenças de 3 a 6 dB(A) entre os valores simulados e medidos para uma amostra de tráfego aéreo aleatória, entretanto, os autores utilizaram uma segunda metodologia para contagem de tráfego aéreo resultando em uma diferença máxima entre os valores simulados e medidos de 1,7 dB(A).

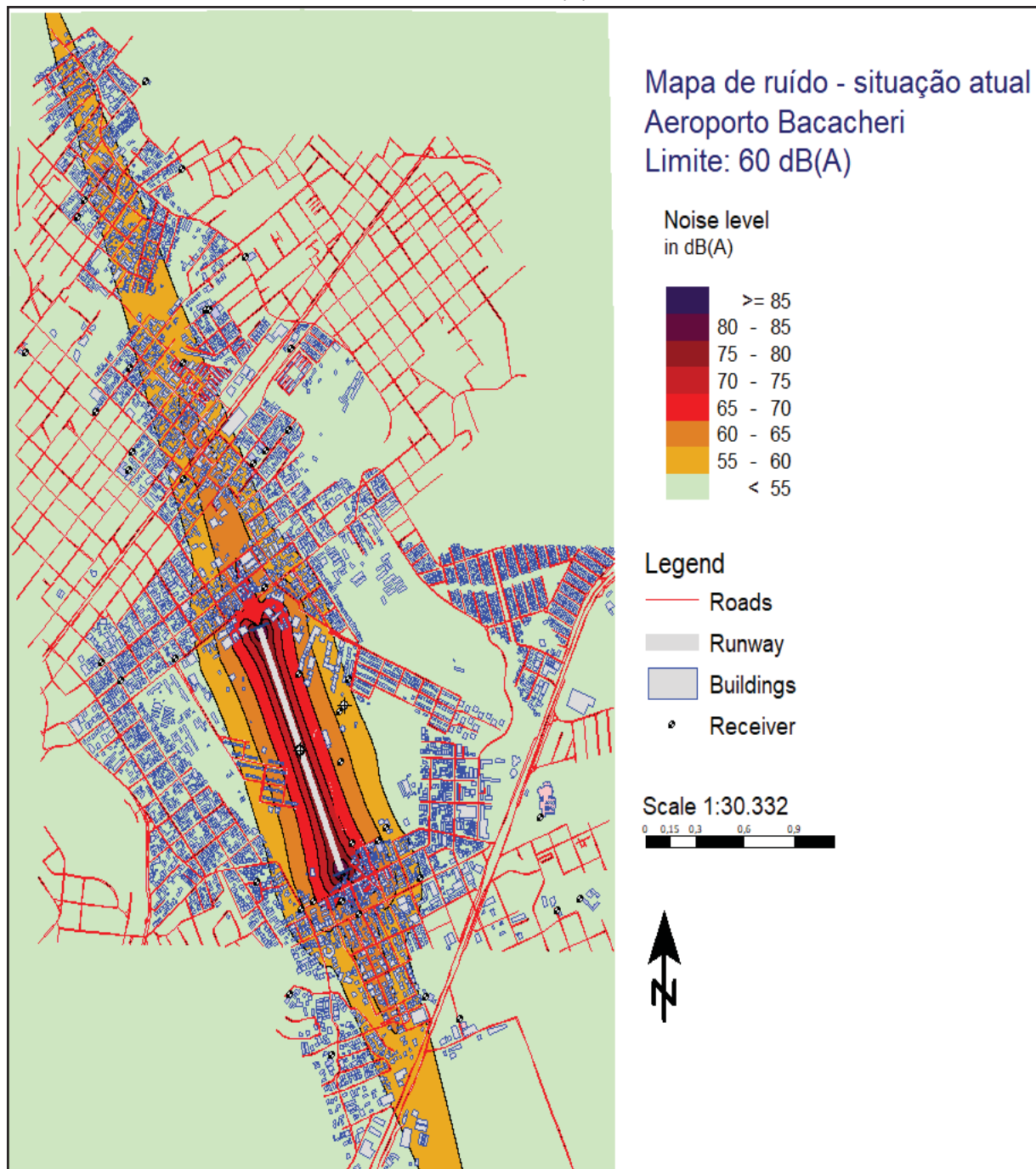
Gerolymatou et al. (2019) analisaram a diferença estatística entre os valores calculados e medidos e encontraram variação de 2,5 % a 23 %.

Como a Agência Portuguesa do Ambiente (2011) recomenda que a diferença entre os valores simulados e medidos não ultrapasse  $\pm 2$  dB(A), pode-se assumir que o modelo está válido.

### 7.3.2 Mapeamento acústico – Situação atual

O primeiro mapeamento acústico de ruído aeroviário, apresentado na Figura 50, indica a situação acústica atual do aeroporto no período diurno para o tráfego aéreo de 2018. O mapeamento acústico representa as curvas isofônicas com origem na pista de operações do aeroporto Bacacheri, divididas em faixas de 5 em 5 dB(A), representadas pelas cores mais escuras, partindo do valor mais alto de 85 dB(A) até 55 dB(A), com redução gradual da intensidade de cor, sendo os valores abaixo de 55 dB(A) representados pela cor verde.

FIGURA 50: MAPA DE RUÍDO AEROVIÁRIO DO AEROPORTO BACACHERI – SITUAÇÃO ATUAL  
ATÉ 55 dB(A)

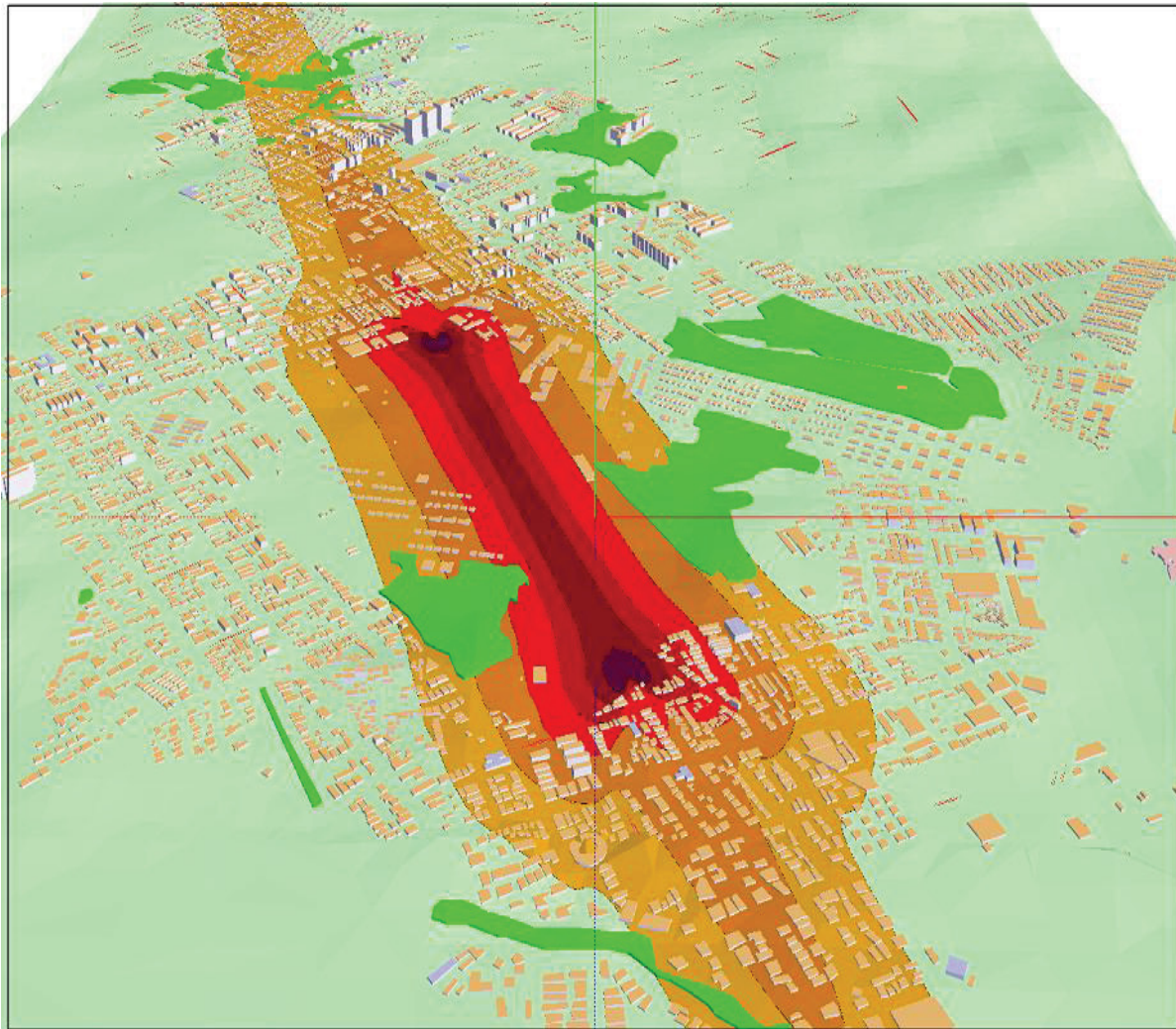


FONTE: o autor (2019).

Para melhor ilustração, a Figura 51 mostra o mapeamento acima com a vista 3D da simulação, contendo as áreas de vegetação, representadas pelas manchas verdes claro, que são elementos absorvedores de som:



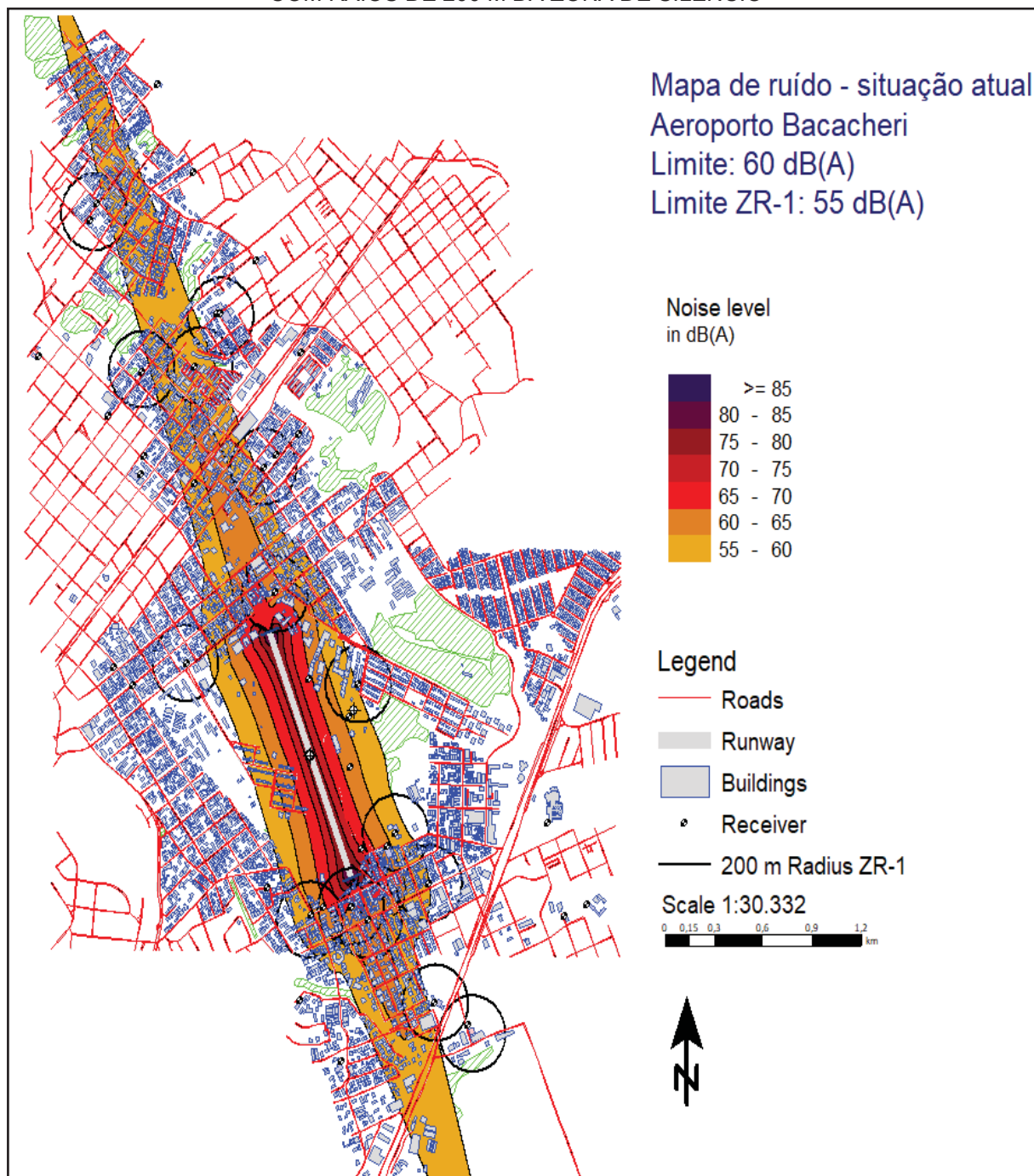
FIGURA 51: VISTA 3D DO MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI.



FONTE: o autor (2019).

Como a legislação municipal de ruído regulamenta o limite de 60 dB(A) para a Zona Especial – Militar, conforme zoneamento urbano, e, restringe o limite de ruído devido à presença de pontos sensíveis como escolas e hospitais, a Figura 52 mostra o mapeamento acústico atual do aeroporto Bacacheri com a inclusão do círculo com raio de 200 m que contempla a zona de silêncio nos pontos sensíveis:

FIGURA 52: MAPA DE RUÍDO AEROVIÁRIO DO AEROPORTO BACACHERI – SITUAÇÃO ATUAL  
COM RAIOS DE 200 M DA ZONA DE SILÊNCIO



FONTE: o autor (2019).

Pelo mapeamento acima, semelhante à Gerolymatou et al. (2019), Olariaga (2018), Licitra et. (2014), Ozkurt (2014) e Bentes et al. (2013), foi possível quantificar a área e estimar a população afetada pelo ruído aeroviário; e, semelhante a Ozkurt (2015) e Tezel et al. (2019), foi possível identificar os pontos sensíveis, escolas e centros de saúde afetados pela poluição sonora.

Em análise com a legislação municipal de ruído, considerando as zonas de silêncio, foram identificados 8 pontos sensíveis afetados pela atividade aeroviária do aeroporto, dentre eles 7 unidades educacionais, incluindo uma instituição de ensino superior e 1 hospital. Mais detalhes extraídos do mapeamento são demonstrados na tabela 21:

TABELA 21: QUANTIFICAÇÃO DOS RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA DO AEROPORTO BACACHERI ATÉ 55 DB (A).

LAeq (dB(A))	Escolas	Centros de saúde	Área (m <sup>2</sup> )	Empreendimentos	População (habitantes)
85-80	-	-	13.825	-	-
80-75	-	-	108.390	8	20
75-70	-	-	302.733	36	60
70-65	-	-	613.054	229	1.600
65-60	3	1	1.346.753	1.150	4.500
60-55	4	-	4.462.360	4.410	15.250

FONTE: o autor (2019).

Seguindo os trabalhos de Tezel et al (2019) e Licitra et al (2014), a estimativa populacional afetada pela poluição sonora foi realizada através da densidade populacional (habitantes/km<sup>2</sup>) e da densidade populacional por domicílio (habitantes/domicílio) do Bairro Bacacheri considerando a taxa de crescimento esperada para 2018 de acordo com o IBGE (2010).

Ao analisar a tabela acima, observa-se que pouca área é afetada pelos elevados níveis de pressão sonora, acima de 70 a 85 dB(A), pois as áreas atingidas pelas faixas de LAeq citadas correspondem majoritariamente ao domínio do CINDACTA II e da Infraero. Porém, como a cabeceira 36 da pista de decolagem possui residências próximas, aproximadamente 30 habitantes são expostos a poluição sonora entre 70 e 75 dB(A).

Em contrapartida, as áreas afetadas pelos níveis de pressão sonora abaixo de 70 dB(A) até 55 dB(A), geram efeitos negativos a população e as atividades do entorno do aeroporto, com uma área significativa com níveis de pressão sonora entre 60 e 55 dB(A), equivalente a 4.462.360 m<sup>2</sup> e uma população atingida estimada de 15.250 habitantes.

Através do mapeamento acústico foi possível identificar e quantificar o valor da LAeq simulado nos pontos sensíveis, demonstrados na tabela 22:

TABELA 22: SITUAÇÃO ATUAL DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO MUNICIPAL DE RUÍDO PARA ZONAS RESIDENCIAIS 1.

Ponto crítico	Estabelecimento	LAeq dB(A)	Limite municipal ZR -1 (dB(A))
Centros educacionais	Centro de Ensino Infantil Hello Kitty	57,7	55
	Colégio Saint Germain	60,9	
	Escola especial Menino Jesus	57,6	
	Escola estadual Nsa. Sra.da Salette	59,6	
	Faculdade São Braz	55	
	Fatum Educacional	64,1	
	Favo de Mel	63,9	
Centro de Saúde	Hospital do Cindacta II	62,5	

FONTE: o autor (2019).

A tabela 22 indica a presença de 8 pontos sensíveis afetados pela poluição sonora oriunda no Aeroporto Bacacheri, com valores de LAeq variando de 55 a 64,1 dB(A), sendo que 4 destes 8 pontos estão acima do permitido pela legislação municipal para o zoneamento ZE-M, equivalente a 60 dB(A).

Destaca-se que, ao considerar o critério de conforto acústico em áreas habitadas da NBR 10.151/19, que estabelece o limite de 50 dB(A) para zonas residenciais com escolas e hospitais, a simulação acústica resultou em 20 pontos sensíveis expostos ao ruído oriundo do Aeroporto Bacacheri, com LAeq variando de 50,8 a 64,1 dB(A), como pode ser observado na tabela 23:



TABELA 23: SITUAÇÃO ATUAL DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA NBR 10.151/19.

Ponto crítico	Estabelecimento	LAeq - dB(A)	Recomendação NBR 10.151/19 dB(A)
Centros educacionais	Centro de Ensino Infantil Hello Kitty	57,7	50
	Colégio Estadual João Paulo I	51,8	
	Colégio Infantil Nazaré	50,5	
	Colégio Nossa Sra. do Rosário ponto 2	51,2	
	Colégio Nossa Sra. do Rosário ponto 1	53,7	
	Colégio Saint Germain	60,9	
	Ensino Infantil Corujinha	52,7	
	Escola Céu Azul	54,6	
	Escola especial Menino Jesus	57,6	
	Escola estadual Nsa. Sra. da Salette	59,6	
	Escola Fundamental Doutel de Andrade	53,8	
	Escola Municipal Prof. Ricardo Krieger	51,4	
	Escola Nsa. Senhora de Nazaré	53,7	
	Faculdade São Braz	55	
	Fatum Educacional	64,1	
	Favo de Mel	63,9	
Centros de Saúde	Hospital do Cindacta II	62,5	
	Instituto de Oncologia	53,6	
	Unidade de Saúde Abaeté	52,2	
	Unidade de Saúde Bacacheri	50,8	

FONTE: o autor (2019).

Considerando que a NBR 10.151/19 recomenda uma restrição maior ao ruído em zonas com escolas e hospitais, visando o bem estar, o conforto da sociedade e à proteção da qualidade atmosférica, percebe-se que há uma demanda para gestão e redução do ruído nos pontos sensíveis. Ao considerar o critério de avaliação da NBR 12.368/1995, as comunidades próximas às cabeceiras da pista do aeroporto possuem embasamento técnico e legal para manifestar ao poder público a necessidade de redução do ruído no Aeroporto Bacacheri.

Conforme o resultado do mapeamento acústico, percebe-se que a comunidade do entorno do Aeroporto Bacacheri está sujeita a efeitos adversos na saúde como perturbações no sono, sinais de irritação, zumbidos no ouvido, dores de cabeça, desânimo e perda parcial ou total da audição devido à exposição a ruídos acima de 55 dB(A) (GEROLYMATOU et al., 2019; TEZEL et al., 2019; ASENSIO, 2017; ZANNIN et al., 2016; LICITRA et al., 2014). Além disso, Asensio (2017) disserta que, quanto maior o tempo de exposição e maior o nível de pressão sonora do ruído maior o risco da ocorrência de hipertensão, derrame cerebral, ataques de coração e doença coronária cardíaca.

Entretanto, Asensio (2017) recomenda que o aeroporto e a comunidade devem debater através de audiências públicas todos e quaisquer assuntos relacionados a impactos que o aeroporto gera ou venha a gerar, evitando conflitos e ações judiciais.

O mesmo autor sugere a aplicação de alguns instrumentos de inclusão da comunidade no contexto socioambiental do aeroporto. Os instrumentos como palestras, vídeos e publicações em redes sociais, criadas de maneira coloquial e acessível ao público, conscientizando-os sobre as métricas de ruído, sobre os indicadores de saúde relacionando-os com tempo de exposição-resposta, sobre os efeitos adversos do ruído, criação de banco de dados relativo ao monitoramento contínuo de ruído e sobre as medidas mitigatórias utilizadas e planejadas para redução do ruído nos aeroportos.

### 7.3.3 Medidas Mitigatórias

Os resultados obtidos nas seções anteriores comparados com os resultados das entrevistas de Zannin et al. (2016) indicam a existência de poluição sonora no entorno do Aeroporto Bacacheri, impactando negativamente uma vasta área e uma grande quantidade de pessoas. Os resultados evidenciam a necessidade de aplicação de ferramentas de gestão de controle e redução de ruído.

O ICAO (2007) indica quatro instrumentos para a gestão do ruído em aeroportos, que quando atuam juntas, contemplam o programa de balanço equilibrado. São eles: a redução de ruído na fonte, o plano de zoneamento de uso e

ocupação do solo, restrições operacionais e redução do ruído em procedimentos operacionais, detalhados na seção 4.4.

Diversos instrumentos de mitigação de ruído aeroviário foram estudados por outros autores. Gerolymatou et al. (2019) propõem um plano de ações de redução de ruído baseado no conceito holístico, urbano e ambiental; Olariaga (2018) verificou a eficiência do instrumento do plano de zoneamento de ruído aeroviário; Licitra et al (2014) simularam cenários de redução de ruído utilizando o instrumento de restrições operacionais em função da inclinação de decolagem e Gagliardi (2018) avaliou procedimentos operacionais que podem ser aplicados pelo piloto durante a decolagem para reduzir ruído.

Na presente seção, foram simulados dois cenários para mapeamento acústico considerando dois instrumentos de redução seguindo as abordagens do ICAO (2007): restrições operacionais e redução de ruído na fonte, priorizando aeronaves com certificação de menor emissão de ruído, sendo eles:

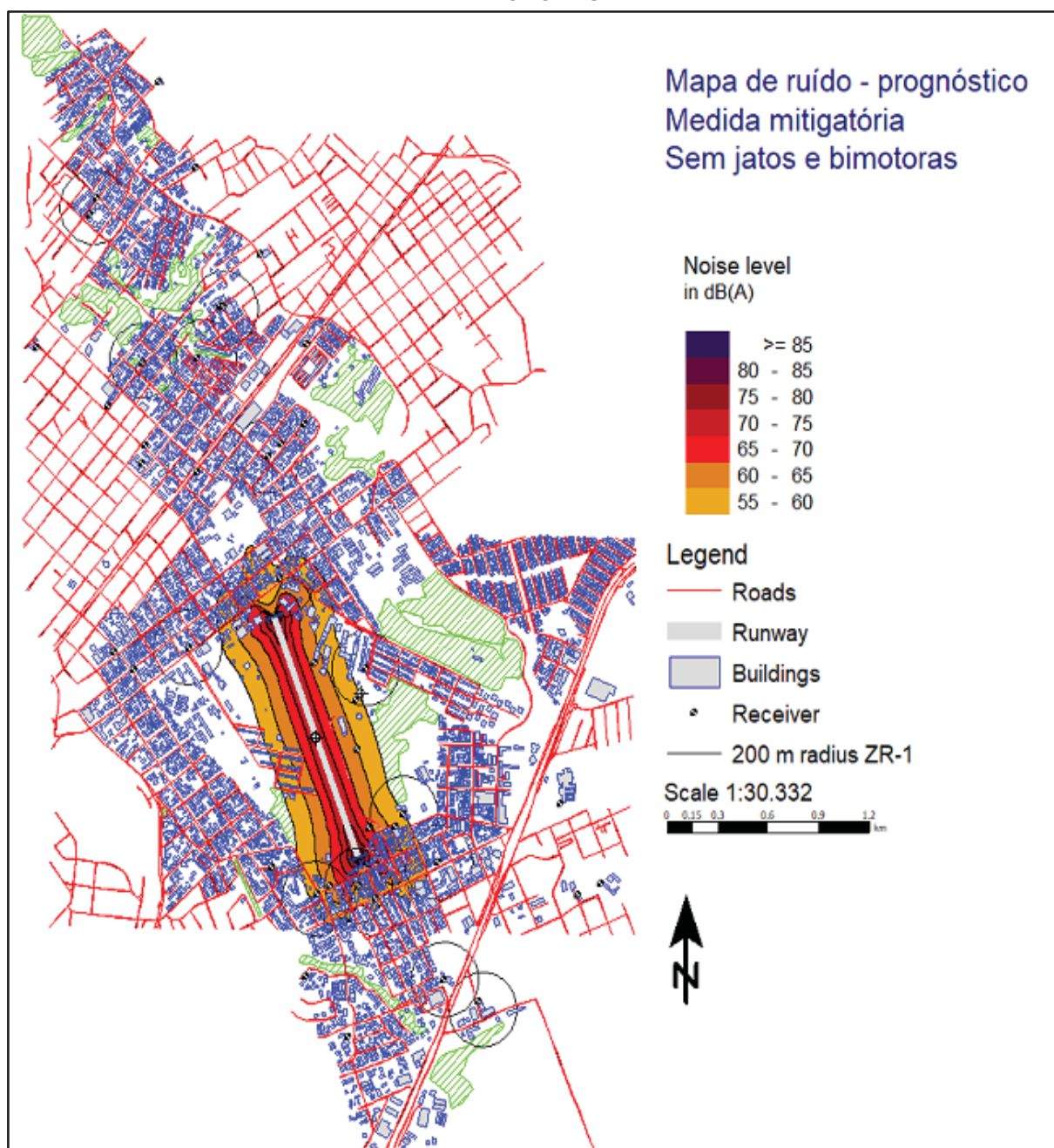
- I. Cenário 1: Remoção das aeronaves a jato e bimotoras;
- II. Cenário 2: Remoção das aeronaves com certificação ruidosa.

#### 7.3.3.1 Cenário 1 – Restrições operacionais

Para o cenário 1, adotou-se o instrumento recomendado do ICAO (2007) de redução do ruído por restrições operacionais, removendo as aeronaves mais potentes e pesadas do tráfego aéreo - as aeronaves a jato e bimotoras - mantendo-se somente as aeronaves monomotoras. O mapeamento para o cenário 1 pode ser observado na Figura 53:



FIGURA 53: MAPA DE RUÍDO – MEDIDA MITIGADORA: REMOÇÃO DE AERONAVES A JATO E BIMOTORAS



FONTE: o autor (2019).

Percebe-se pela Figura 53 que houve redução nas áreas afetadas pelas curvas isofônicas até 55 dB(A) em relação ao mapeamento da Figura 52 na seção 7.4.2. A tabela 24 indica os receptores sensíveis, a área, número de empreendimentos e população estimada afetada pela poluição após a medida de redução de ruído:

TABELA 24: QUANTIFICAÇÃO DOS RECEPTORES AFETADOS PELO RUÍDO COM A MEDIDA MITIGATÓRIA DE REMOÇÃO DAS AERONAVES A JATO E BIMOTORAS

L <sub>Aeq</sub> (dB(A))	Escolas	Centros de saúde	Área (m <sup>2</sup> )	Empreendimentos	População (habitantes)
85-80	-	-	8.578	-	-
80-75	-	-	41.450	8	20
75-70	-	-	222.980	36	60
70-65	-	-	465.410	160	850
65-60	-	-	790.100	410	2.700
60-55	4	1	1.351.067	1.000	4.500

FONTE: o autor (2019).

Em relação à situação atual simulada, obtém-se uma redução de 69 % da área e da população atingida pela poluição sonora gerada no aeroporto, bem como o reenquadramento de 3 estabelecimentos educacionais para o L<sub>Aeq</sub> permitido pela legislação municipal. A aplicação da medida de redução do ruído referente à retirada das aeronaves bimotoras e a jato obteve reduções de 2,1 a 8,4 dB(A) nos pontos críticos, como pode ser observado na tabela 25:

TABELA 25: COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE LAEQ NOS PONTOS CRÍTICOS COM A MEDIDA DO CENÁRIO 1, EM DB(A).

Ponto crítico	Estabelecimento	L <sub>Aeq</sub> atual	L <sub>Aeq</sub> cenário 1	Diferença (atual – cenário 1)	Limite municipal ZR -1
Centros educacionais	Ensino Infantil Hello Kitty	57,7	50,7	7,0	55
	Colégio Saint Germain	60,9	58,5	2,4	
	Escola especial Menino Jesus	57,6	55	2,6	
	Escola estadual Nsa. Sra. da Salette	59,6	57,5	2,1	
	Faculdade São Braz	55	47,5	7,5	
	Fatum Educacional	64,1	55,7	8,4	
	Favo de Mel	63,9	58,1	5,8	
Centro de Saúde	Hospital do Cindacta II	62,5	57,7	4,8	

FONTE: o autor (2019).

Ao utilizar o critério de conforto acústico para áreas habitadas conforme a NBR 10.151/19 para zonas com escolas e hospitais, percebe-se o reenquadramento de 10 dos 20 pontos sensíveis que outrora estavam expostos a poluição sonora oriunda do aeroporto. A diferença entre a situação atual simulada e o cenário 1 pode ser observada na tabela 26:

TABELA 26: CENÁRIO 1 DO ENTORNO DO AEROPORTO EM PONTOS CRÍTICOS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA NBR 10.151/19. VALORES EM DB(A).

Ponto crítico	Estabelecimento	LAeq Atual	LAeq – cenário 1	Diferença (atual – cenário 1)	Critério NBR 10.151/19
Centros educacionais	Ensino Infantil Hello Kitty	57,7	50,7	7,0	50
	Colégio Estadual João Paulo I	51,8	46,7	5,1	
	Colégio Infantil Nazaré	50,5	45,5	5,0	
	Colégio Nossa Sra. do Rosário ponto 2	51,2	45,8	5,4	
	Colégio Nossa Sra. do Rosário ponto 1	53,7	47,7	6,0	
	Colégio Saint Germain	60,9	58,5	2,4	
	Ensino Infantil Corujinha	52,7	50,1	2,6	
	Escola Céu Azul	54,6	51,8	2,8	
	Escola especial Menino Jesus	57,6	55	2,6	
	Escola estadual Nsa. Sra. da Salete	59,6	57,5	2,1	
	Escola Fundamental Doutel de Andrade	53,8	48,2	5,6	
	Escola Municipal Prof. Ricardo Krieger	51,4	46,5	4,9	
	Escola Nsa. Senhora de Nazaré	53,7	47,9	5,8	
	Faculdade São Braz	55	47,5	7,5	
	Fatum Educacional	64,1	55,7	8,4	
	Favo de Mel	63,9	58,1	5,8	
Centros de Saúde	Hospital do Cindacta II	62,5	57,7	4,8	
	Instituto de Oncologia	53,6	51,3	2,3	
	Unidade de Saúde Abaeté	52,2	47,3	4,9	
	Unidade de Saúde Bacacheri	50,8	48,3	2,5	

FONTE: o autor (2019).

### 7.3.3.2 Cenário 2 – Redução de ruído na fonte

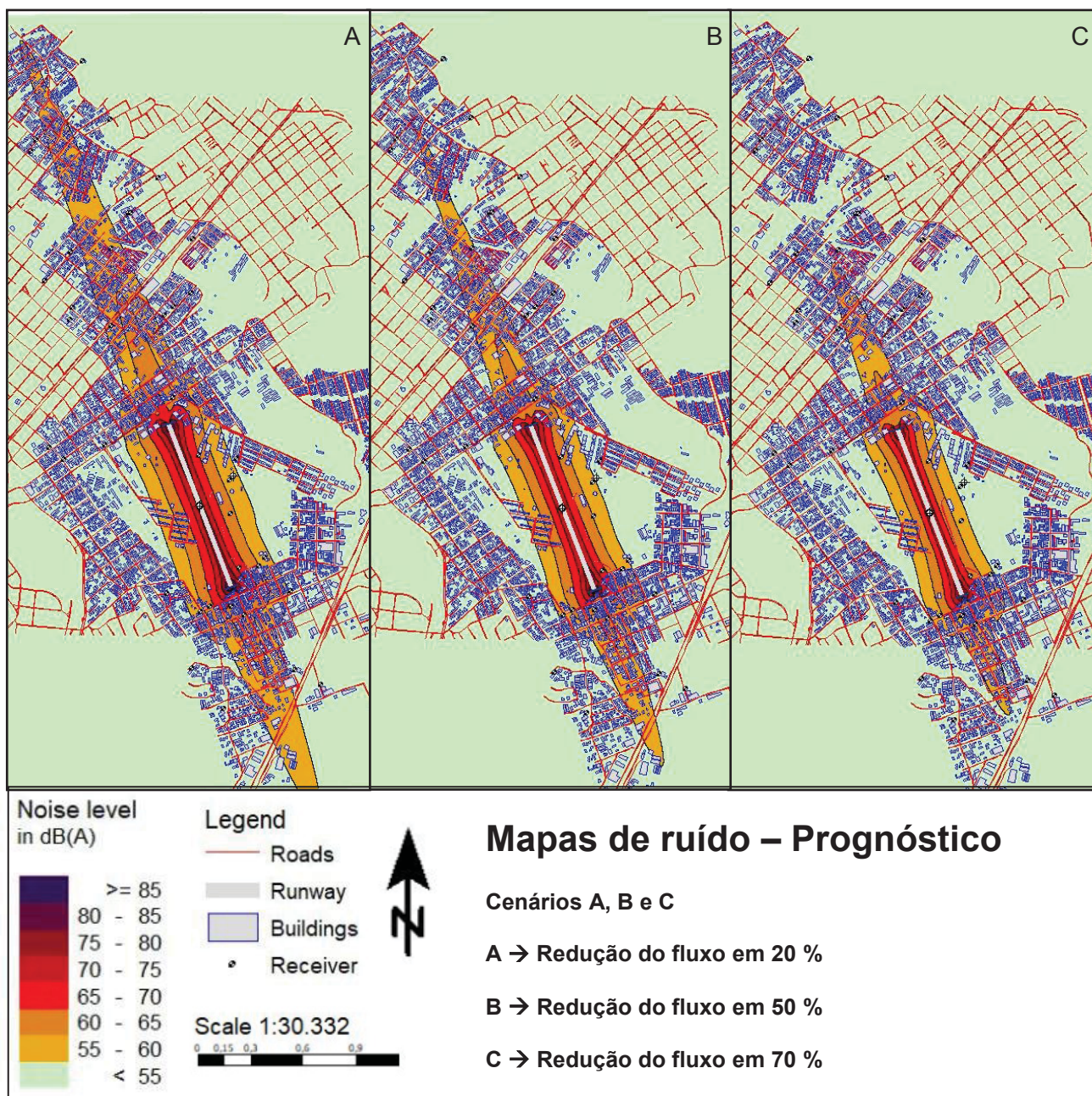
Para o cenário 2, adotou-se o instrumento recomendado do ICAO (2007) de redução de ruído na fonte, que consiste na alteração do fluxo das aeronaves que possuem certificação de ruído ultrapassadas (abaixo de capítulo 3). Entretanto, considerando o contexto do Aeroporto Bacacheri, sendo o tráfego aéreo composto 80 % por aeronaves monomotoras e 18 % por aeronaves bimotoras, os quais tem a certificação de ruído ultrapassada, e apenas 2 % composto por aeronaves a jato, as

quais são certificadas, a restrição total do tráfego de aeronaves não certificadas apresenta-se como uma alternativa inviável.

Diante disto, simularam-se medidas mitigatórias através de três cenários de redução do tráfego, com reduções de 20 %, 50 % e 70 % do fluxo atual das aeronaves com certificação mais ruidosa. Todas as aeronaves com certificação abaixo do capítulo 3 tiveram seu fluxo aéreo alterado. O mapeamento acústico da área considerando os três cenários mitigatórios e a quantificação das áreas atingidas pela poluição podem ser observados na Figura 54 e na tabela 27. O mapeamento acústico ampliado das medidas mitigatórias pode ser observado nos apêndices A, B e C.



FIGURA 54: MAPAS DE RUÍDO DAS MEDIDAS MITIGADORAS: A) REDUÇÃO DE 20 % DO TRÁFEGO; B) REDUÇÃO DE 50 % DO TRÁFEGO E C) REDUÇÃO DE 70 % DO TRÁFEGO.



FONTE: o autor (2019).

TABELA 27: QUANTIFICAÇÃO DE RECEPTORES AFETADOS PELA POLUIÇÃO SONORA APÓS REDUÇÃO DE FLUXO DAS AERONAVES CERTIFICADAS

Redução tráfego	LAeq (dB(A))	Escolas	Centros de saúde	Área (m²)	Empreendimentos	População (habitantes)
20 %	85-80	-	-	-	-	-
	80-75	-	-	115.834	3	10
	75-70	-	-	265.454	15	40
	70-65	-	-	465.570	174	1.250
	65-60	3	1	1.220.786	873	4.100
	60-55	3	-	2.892.161	3.350	10.400
50 %	85-80	-	-	-	-	-
	80-75	-	-	70.775	-	-
	75-70	-	-	229.078	15	40
	70-65	-	-	394.629	147	1.050
	65-60	2	-	865.351	738	2.890
	60-55	3	1	2.090.051	2.065	7.500
70 %	85-80	-	-	-	-	-
	80-75	-	-	20.100	-	-
	75-70	-	-	124.100	9	30
	70-65	-	-	282.164	106	750
	65-60	-	-	616.988	526	2.060
	60-55	3	1	1.280.120	1.265	4.600

FONTE: o autor (2019).

Analisando a Figura 54 e a tabela 27 percebe-se uma significativa redução dos receptores atingidos pela poluição ao aplicar a metodologia proposta de redução de ruído em relação à situação atual simulada. Pode-se perceber que usando o critério mais restrito de 70 % da redução do tráfego de aeronaves não certificadas, aproximadamente 4.600 pessoas estariam sujeitas ao ruído gerado no aeroporto, enquanto para a situação menos restrita, 20 % a menos do tráfego, aproximadamente 10.400 pessoas permaneceriam expostas ao impacto negativo do ruído aeroviário.

Os resultados das simulações para os cenários de redução podem ser observados na tabela 28 comparados com o LAeq dos pontos sensíveis calculados anteriormente, vistos na tabela 22:



TABELA 28: COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE LAEQ NOS PONTOS CRÍTICOS COM AS MEDIDAS DO CENÁRIO 2, EM DB(A).

Ponto Crítico	LAeq atual	20 %	AT <sup>1</sup> - 20%	50 %	AT - 50%	70 %	AT - 70%
Ensino Infantil Hello Kitty	57,7	56,8	0,9	55	2,7	53,2	4,5
Colégio Saint Germain	60,9	60	0,9	58	2,9	56	4,9
Escola especial Menino Jesus	57,6	56,7	0,9	54,7	2,9	52,7	4,9
Escola estadual Nsa. Sra. Da Salete	59,6	58,7	0,9	56,7	2,9	54,7	4,9
Faculdade São Braz	55	52,9	2,1	51,1	3,9	49,3	5,7
Fatum Educacional	64,1	63,2	0,9	61,6	2,5	59,9	4,2
Favo de Mel	63,9	63,1	0,8	61,3	2,6	59,6	4,3
Hospital do Cindacta II	62,5	61,6	0,9	59,7	2,8	57,9	4,6

<sup>1</sup> Diferença entre o valor simulado da situação atual (AT) e o valor simulado da medida mitigatória para 20%, 50 % e 70% de redução.

FONTE: o autor (2019).

Analisando a tabela 28, observa-se que ao reduzir o fluxo das aeronaves sem certificação de ruído em 20 %, há a redução pouco significativa em relação a situação atual – de 0,9 a 2,1 dB(A) - tendo apenas um ponto crítico readequado para o limite municipal. Ao considerar a redução do fluxo em 50 %, percebe-se que 3 dos 8 pontos críticos expostos a poluição sonora se adéquam ao critério legal, havendo reduções no nível de pressão sonora de 2,6 a 3,9 dB(A). Observando a redução de 70 % do fluxo de aeronaves não certificadas, observa-se a adequação de 4 pontos dos 8 afetados pela poluição sonora, com redução do nível de pressão sonora de 4,2 a 5,7 dB(A).

Destaca-se que, mesmo com os 3 cenários propostos, 4 pontos sensíveis expostos ao ruído aeroviário permanecem com LAeq em desacordo com a legislação, acima de 55 dB(A).

Embora o trabalho de Licitra et al. (2014) contextualize uma situação diferente de tráfego aéreo e porte em relação ao Aeroporto Bacacheri - com duas pistas operacionais e tráfego de aeronaves militares - os autores encontraram, através de simulações acústicas, reduções do ruído aeroviário entre 4,5 a 7,7 dB(A) para cenários utilizando o instrumento de redução do ruído sugerido por ICAO (2007) de restrições operacionais. De forma semelhante, para o presente o trabalho, houve reduções de 0,9 a 8,4 dB(A) para os instrumentos de redução de ruído de restrição operacional e redução de ruído na fonte.

Em ambos os casos, mesmo considerando as diferenças e condições operacionais dos aeroportos em questão, a simulação de mapas estratégicos de ruído considerando medidas de redução de ruído mostra-se uma ferramenta importante para verificar a eficiência das medidas de que poderão ser implantadas.

A tabela 29 indica um resumo considerando ambos cenários de redução de ruído com status qualitativo em relação à condição acústica nos pontos sensíveis, considerando o limite municipal de ruído para Zonas Residenciais 1, de 55 dB(A).

TABELA 29: AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS MEDIDAS MITIGATÓRIAS.

Ponto Crítico	Cenário 1	Cenário 2					
		20 %	Condição acústica	50 %	Condição acústica	70 %	Condição acústica
Ensino Infantil Hello Kitty	Adequada	Irregular		Adequada		Adequada	
Colégio Saint Germain	Irregular	Irregular		Irregular		Irregular	
Escola especial Menino Jesus	Adequada	Irregular		Adequada		Adequada	
Escola estadual Nsa. Sra. Da Salete	Irregular	Irregular		Irregular		Adequada	
Faculdade São Braz	Adequada	Adequada		Adequada		Adequada	
Fatum Educacional	Irregular	Irregular		Irregular		Irregular	
Favo de Mel	Irregular	Irregular		Irregular		Irregular	
Hospital do Cindacta II	Irregular	Irregular		Irregular		Irregular	

FONTE: o autor (2019).

## 8. CONCLUSÕES

A metodologia utilizada aliando medição de parâmetros acústicos e simulação computacional mostrou-se eficiente, uma vez que permite a caracterização completa do ruído aeroviário. Ela envolve a identificação dos picos dos níveis de pressão sonora durante a operação de aeronaves, as componentes tonais dos eventos aeroviários e o mapeamento acústico da área permitindo identificar e quantificar os pontos críticos, receptores e áreas críticas expostas à poluição sonora do aeroporto.

Através da metodologia aplicada, foi possível caracterizar o ambiente acústico próximo ao aeroporto, permitindo concluir que há poluição sonora devido à operação de aeronaves, com valores elevados do nível de pressão sonora, variando entre 58 a 98 dB(A) de LAeq e atingindo LAmáx de 102 dB(A), principalmente nas áreas próximas as cabeceiras da pista de decolagem. Tais resultados indicam a existência de impactos ambientais negativos influenciando as comunidades circunvizinhas, evidenciando a necessidade de implantação de medidas que atenuem o ruído.

A utilização de medidas mitigatórias para redução do ruído envolvendo os mecanismos sugeridos pelo ICAO apresentou reduções significativas de áreas expostas e população atingida, principalmente com a redução total do fluxo de aeronaves a jato e bimotoras, correspondente a 20 % do fluxo total de aeronaves do aeroporto. Entretanto, em função do tipo, origem e magnitude do ruído, é impossível reduzir a poluição sonora em sua totalidade sem que isso traga impactos sociais e econômicos negativos à comunidade. É importante destacar que mesmo aplicando diversos cenários de redução de ruído, ao menos 4 pontos sensíveis continuariam expostos ao ruído aeroviário, com LAeq acima do permitido pela lei municipal, equivalente a 55 dB(A).

Como a exposição ao ruído aeroviário afeta negativamente o desempenho profissional, acadêmico e escolar, diante dos diagnósticos e prognósticos simulados, recomenda-se que os pontos sensíveis afetados pela poluição atuem de maneira conjunta com a administradora do aeroporto, visando buscar a melhor maneira de reduzir os impactos causados pela poluição sonora com comunicação e participação.

Por fim, conclui-se que, devido ao ruído aeroviário possuir características peculiares, como a presença de altos níveis de pressão sonora e uma extensa área de propagação, a aplicação de apenas uma ou outra medida mitigatória mostra-se

parcialmente efetiva. Idealiza-se a aplicação simultânea de diversos instrumentos de redução do ruído, envolvendo a gestão pública, a gestora do aeroporto e a comunidade envolvida.

Entre os instrumentos da gestão compartilhada do ruído citam-se a revisão do zoneamento de uso e ocupação do solo e dos limites de ruídos permitidos, a redução da permissão de aeronaves mais ruidosas, alterações em procedimentos de decolagens, priorizar cabeceiras preferencialmente distante de centros populacionais, alteração do tráfego, criação de canais de ouvidoria para comunicação ao público, palestras e exposições com linguagem acessível sobre o tema de ruído e audiências públicas quando envolver quaisquer tomadas de decisões que causem impacto a rotina e a dinâmica socioeconômica ambiental da comunidade do entorno do aeroporto.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 11415** – Ruído aeronáutico. Rio de Janeiro. 1990. 10 p.
- ABNT. **NBR 13368** – Ruído gerado por aeronaves: monitoração. Rio de Janeiro. 1995. 2 p.
- ABNT. **NBR-10151**: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas – aplicação de uso geral. 2 ed. 2019. 24 p.
- AIRBUS GLOBAL MARKET FORECAST. **Global Networks, global citizens**: 2018-2037. 2018. 83 p.
- ALIMOHAMMADI, Iraj; EBRAHIMI, Hossein. Comparison between effects of low and high frequency noise on mental performance. **Applied Acoustics**. Tehran, p. 131-135. Mai 2017.
- ALONSO, Gustavo; BENITO, A.; BOTO, L. The efficiency of noise mitigation measures at European airports. **World Conference On Transport Research Society**, Madrid, v. 25, n. 1, p.103-135, jun. 2017.
- AMBIENTE, Agência Portuguesa do (Org.). **Diretrizes para elaboração de Mapas de Ruído**. 3. ed. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente, 2011. 31 p.
- ANAC. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil nº 161** – Planos de zoneamento de ruído de aeródromos (PZR). 2013. 18 p.
- AUSEJO, Miguel et al. Improvement of the Quality of Input Data and its Effect in the Uncertainty of a Noise Map. In: CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 1., 2010, Madrid. **Article**. Ljubljana: EAA, 2010. p. 1 - 6.
- ASENSIO, C.; GASCO, L.; ARCAS, G. de. A Review of Non-Acoustic Measures to Handle Community Response to Noise around Airports. **Curr Pollution Rep**, Madrid, v. 3, n. 3, p.230-244, jun. 2017.
- BENTES, F. M.; HELENO, T. A.; SLAMA, J. G. Analysis of airport noise exposure around Viracopos International Airport using geographic information systems. **Journal Of Air Transport Management**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p.15-17, ago. 2013.
- BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. 1 ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 2006.
- BISTAFA, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle de ruído. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011. 380 p.
- BRASIL (Município). Lei nº 9800, de 2000. Curitiba, PR.
- BRASIL (Município). Lei nº 16625, de 2002. Curitiba, PR.

BRUEL & KJAER SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S. **Environmental Noise**

BRUEL & KJAER. Urban Noise Planning and Mapping. 2017. Disponível em: < <https://www.bksv.com/en/Applications/environment-noise-and-vibration/urban-noise-planning-and-mapping> >. Acesso em: 14 de junho de 2018.

CONFERENCE, European Civil Aviation. **Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports**: Volume 2: Technical Guide. 3. ed. Neuilly-sur-seine: ECAC.CEAC, 2005. 126 p.

DE MARCO, C. S., **Elementos de acústica arquitetônica**. São Paulo: Nobel. 1982.

DINATO, Antonio Carlos. **Ruído sonoro no entorno de aeroportos: Um estudo de caso no aeroporto de Ribeirão Preto**. 2011. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

EPA – Environmental Protection Agency. **Guidance note for strategic noise mapping**: for the Environmental Noise regulations 2006. Wexford. 2011. Disponível em: <[https://www.epa.ie/pubs/advice/noisemapping/EPAGuidanceNoteforStrategicNoiseMapping\(version 2\).pdf](https://www.epa.ie/pubs/advice/noisemapping/EPAGuidanceNoteforStrategicNoiseMapping(version%202).pdf) > Acesso em: 14 de junho de 2018.

ESPEY, Molly; LOPEZ, Hilary. The Impact of Airport Noise and Proximity on Residential Property Values. **Growth And Change**: A journal of urban and regional policy, South Caroline, v. 31, n. 3, p.408-419, dez. 2002.

EUROPEAN UNION DIRECTIVE 2002/49/EC relating to the **Assessment and Management of Environmental Noise**. Official Journal of the European communities: 2002. No. L. 189.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. **Master Handbook of Acoustics**, 5 ed. McGraw-Hill 2009.

FERNANDES, J.C., **Apostila de acústica e ruídos**. Faculdade de engenharia – Universidade Estadual de São Paulo – Bauru. 2002.

FIEDLER, P. E. K. **Poluição Sonora nos Eixos Estruturais de Transportes da Cidade de Curitiba-PR**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 2013.

FILIPPONE, Antonio. Aircraft Noise Prediction. **Progress In Aerospace Sciences**, Manchester, v. 68, p.27-63, mar. 2014.

GAGLIARDI, Paolo; TETI, Luca; LICITRA, Gaetano. A statistical evaluation on flight operational characteristics affecting aircraft noise during take-off. **Applied Acoustics**, Roma, v. 134, n. 1, p.8-15, jan. 2018.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2 ed. Florianópolis, 2000;

GEROLYMATOU, Gerogia et al. Assessing Health Effects and Soundscape Analysis as New Mitigation Actions Concerning the Aircraft Noise Impact in Small- and Middle-Size Urban Areas in Greece. **Environments**, Volos, v. 4, n. 6, p.1-15, jan. 2019.



HAMANCI, Samet Feyyaz et al. Determining characteristics of lands affected by noise pollution of airports. **Fresenius Environmental Bulletin**, Kocaeli, v. 26, n. 1, p.69-74, jan. 2017.

HASSAL, J. R.; ZAVERI, K.; **Acoustic Noise Measurement**. 4 ed. Dinamarca: Brüel & Kjaer Magazine. 1979

ICAO – International Civil Aviation Organization. Environmental Protection, annex 16, vol. I, Aircraft Noise, First edition, 1971.

ICAO – International Civil Aviation Organization. Environmental Report. 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1996/3: **Acoustics: Description and measurements of environmental noise**. Part 3: Application to noise limits, 1996/3. Suíça, 1987. 3p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3891 Acoustics – Procedure for describing aircraft noise heard on the ground**, Geneva, 1978.

KANG, J. **Urban Sound Environment**. London. Taylor and Francis; 2007

LICITRA, Gaetano et al. Noise mitigation action plan of Pisa civil and military airport and its effects on people exposure. **Applied Acoustics**, Pisa, v. 84, n. 1, p.25-36, fev. 2014.

LONG, Marshall. **Architectural Acoustics**. California: Elsevier, 2006. 873 p.

MORAIS, Ludmila R. de; SLAMA, Jules G.; MANSUR, Webe J. Eficiência da utilização de barreiras acústicas no controle do ruído aeroportuário. **Sítiaer** 7, Coimbra, p.732-744, dez. 2008.

MORAIS, Ludmila Rodrigues de. **Estudo de Barreiras acústicas no controle de ruído aeroviário**. 2008. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MURPHY, E. KING, E.A. **Environmental Noise Pollution: Noise Mapping, Public Health and Policy**. Elsevier. San Diego, CA. 2014

NETO, Antonio Giovanelli. **Análise do ruído aeronáutico no entorno do aeroporto de São José dos Campos**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.

NUNES, Maria Fernanda de Oliveira. **Avaliação da percepção do ruído aeronáutico em escolas**. 2005. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

OLARIAGA, Óscar Diaz. Análisis de mitigación de ruido aeroportuario: El caso del aeropuerto internacional de Bogotá- El Dorado (Colombia). **Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales**, Bogotá, v. 50, n. 197, p.557-576, fev. 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Carga de doenças por ruído ambiental** -

Regional da Organização Mundial da Saúde para a Europa, Copenhagen, 2011.

OZKURT, Nesimi. Current assessment and future projections of noise pollution at Ankara Esenboga Airport, Turkey. **Transportation Research: Part D**, Kocaeli, v. 32, p.120-128, out. 2014.

OZKURT, N.; HAMANCI, S. F.; SARI, D.. Estimation of airport noise impacts on public health. A case study of Izmir Adnan Menderes Airport. **Transportation Research: Part D**, Kocaeli, v. 36, n. , p.152-159, mar. 2015.

PIXININE, Thaísa Loureiro. **Estudo do impacto ambiental sonoro da aviação regular em grandes aeroportos com ênfase no Aeroporto Internacional tom Jobim - galeão**. 2013. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PORTER, N. D.; BERRY, Bernard F.; FLINDELL, I.H. **Health effect based noise assessment methods**: a review and feasibility study. National Physical Laboratory. 1998. 69 p.

PROENÇA, A. R.; ALMEIDA, O. de; SELF, R. H..Aerodynamics and Aeroacoustics Investigation of a Low Speed Subsonic Jet. **Engenharia Térmica**, Uberlândia, v. 13, n. 2, p.33-40, dez. 2014.

**Quantificação de anos de vida saudáveis perdidos na Europa**, Escritório EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Environmental Noise**. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/airs/2016/environment-and-health/environmental-noise>>. Acesso em 31 out. 2018.

REYNOLDS, Douglas D. **Engineering principles of acoustics**: Chapter 12 – Human response to noise. USA: Allyn and Bacon, 1981. 49 p

SALAMA, Khaled Fikry et al. Study of air quality and noise levels in King Fahad International airport in Dammam, Saudi Arabia. **International Journal Of Community Medicine And Public Health**, Dammam, v. 4, n. 3, p.912-918, abr. 2016.

SANTÉ, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. **The effects of environmental noise on health**. Disponível em: <<http://sante.gouv.qc.ca/en/problemes-de-sante/effets-du-bruit-environnemental-sur-la-sante/effets-du-bruit-environnemental-sur-la-sante-physique/>>. Acesso em 31 out. 2018.

SARI, Deniz et al. Measuring the levels of noise at the İstanbul Atatürk Airport and comparisons with model simulations. **Science Of The Total Environment**, Kocaeli, v. 483, n. 482, p.472

SCHULTZ, T. J. **Community Noise Rating**. 2 ed. New York: Elsevier Applied Science, 415 p. 1972.

STORM, Richard. **Health risks due to exposure of low-frequency noise**. 2009. 38 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Som, Universidade de Örebro, Örebro, 2009.

TANDON, N. Aircraft Noise. *Noise & Vibration Worldwide*, 2003, 34 (4): 11-14.

TEZEL, Melike Nese et al. Evaluation of some health impact indices in two airports' domain. **Applied Acoustics**, Kocaeli, v. 149, n. 1, p.99-107, jan. 2019.

TORIJA, Antonio J. et al. On the assessment of subjective response to tonal content of contemporary aircraft noise. **Applied Acoustics**, Southampton, v. 146, n. 1, p.190-203, mar. 2019.

VALIM, Fernanda Caixeta. **Análise das Diferentes Formas de Atenuação do Ruído Aeronáutico**. 155p. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.

VOGIATZIS, Konstantinos. Airport environmental noise mapping and land use management as an environmental protection action policy tool: The case of the Larnaka International Airport (Cyprus). **Science Of The Total Environment**, Volos, v. 1, n. 424, p.162-173, fev. 2012.

WAYE, Kerstin Persson. Noise and Health - Effects of Low Frequency Noise and Vibrations: Environmental and Occupational Perspectives. In: NRIAGU, Jerome O. **Encyclopedia of Environmental Health**. Michigan: Elsevier, 2011. p. 240-253

WG-AEN. European Commission Working Group – Assessment of Exposure to Noise. **Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and Production of Associated Data on Noise Exposure**. Position Paper, Final Draft. Version 2, 13th January 2006.

ZANNIN, P.H.T., BUNN F. Noise annoyance through railway traffic – a case study. **Journal of Environment Health Sciences & Engineering**. 2014. 12:14.

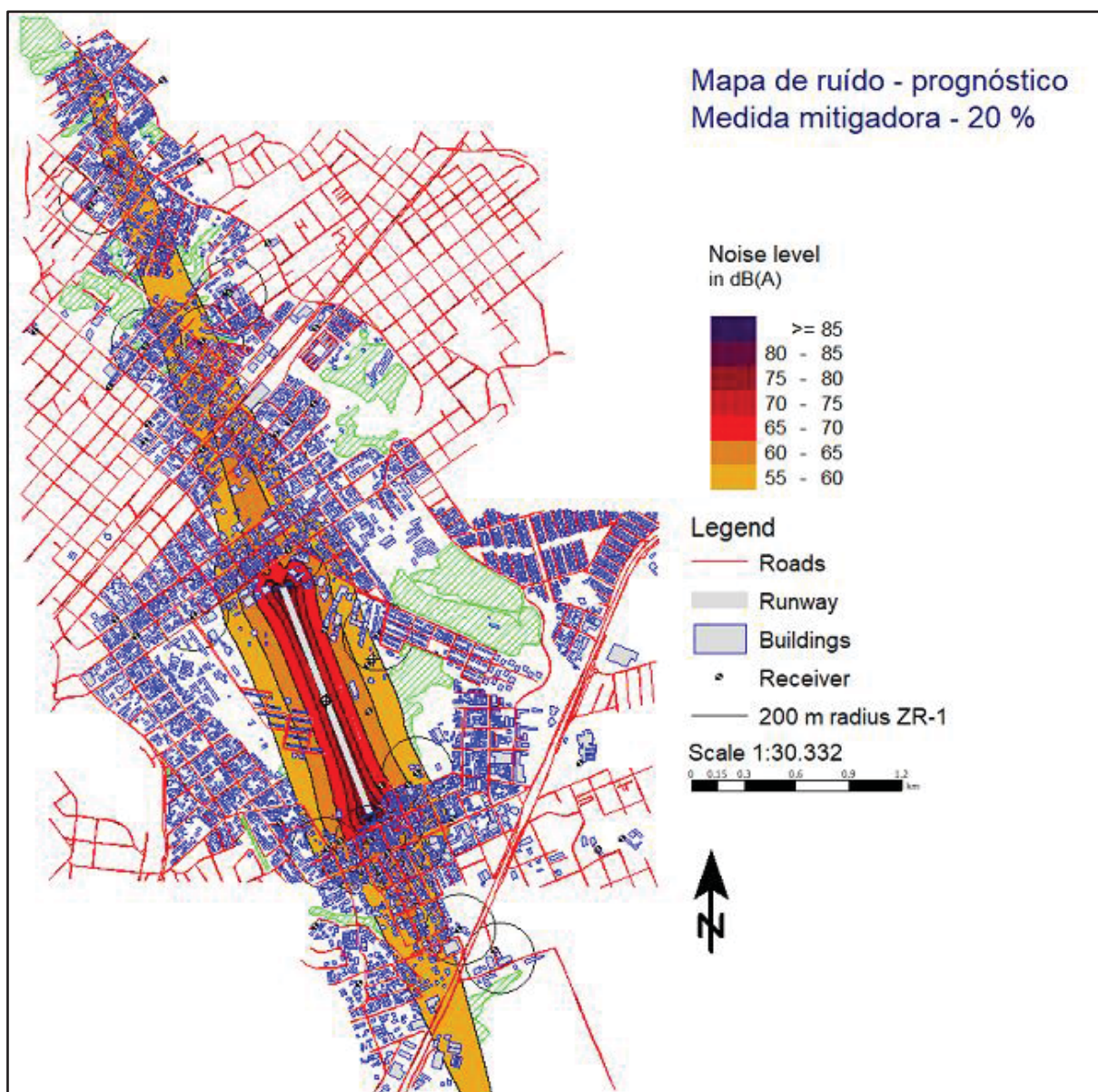
ZANNIN, P. H. T.; CALIXTO, A.; DINIZ, F. B. D.; FERREIRA, J. A. C., Incômodo causado pelo ruído urbano à população de Curitiba, PR. **Revista de saúde pública**. São Paulo, v. 36, n. 4, p. 521-524, 2002.

ZANNIN, Paulo H. T. et al. Annoyance caused by aircraft noise. In: ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta. **Noise Pollution in Urban and Industrial Environments: Measurements and Noise Mapping**. Curitiba: Nova, 2016. p. 289-299.

ZANNIN, Paulo H. T.; LACERDA, A. B. M.; MAGNI, C.; MORATA, T.C.; MARQUES, J. M. Ambiente urbano e percepção da poluição sonora. **Ambiente & Sociedade**. v. 8, n. 2, Curitiba, 2005.

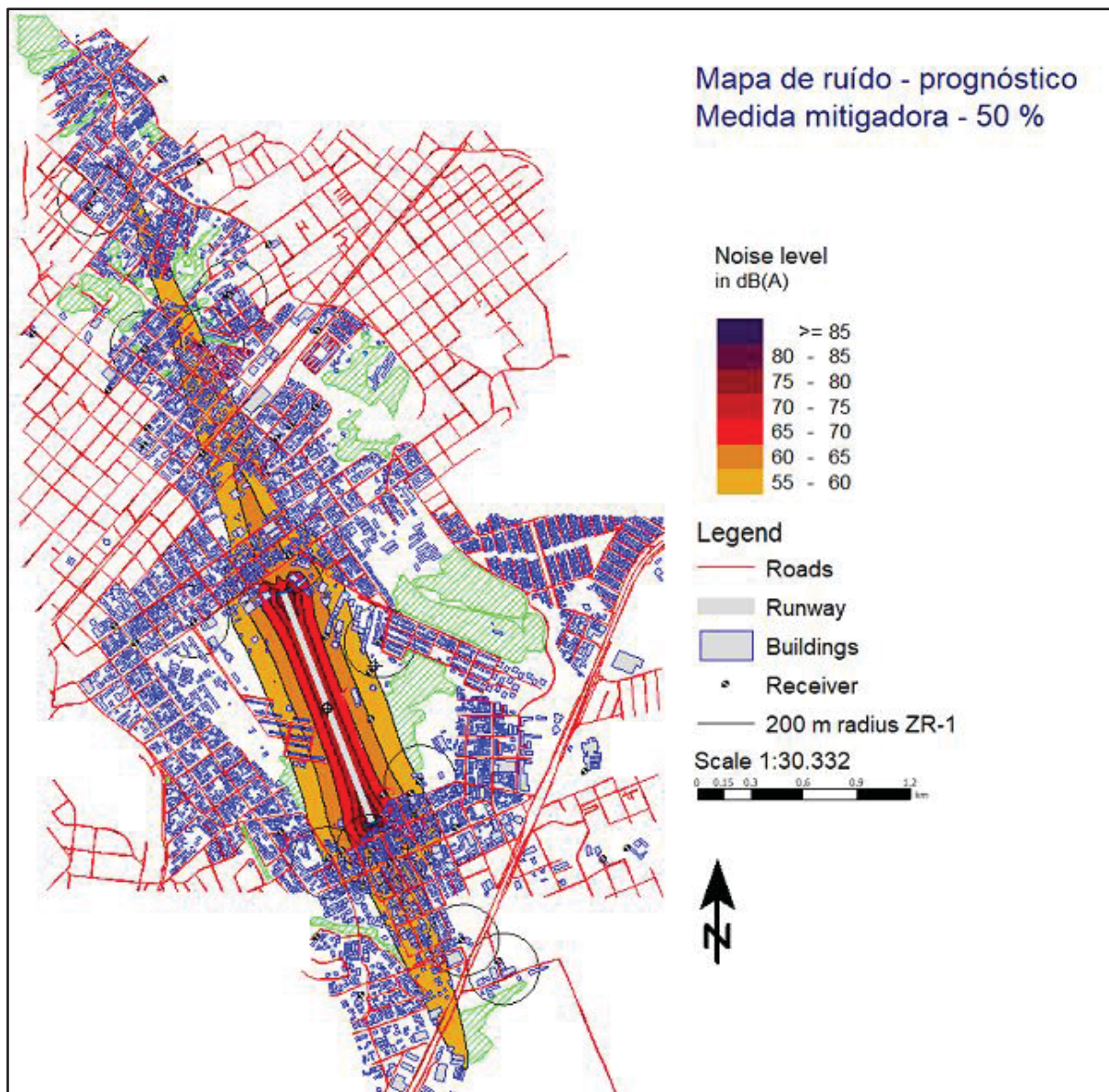
ZANNIN, Paulo H. T.; do Valle, F ; NASCIMENTO, E. O. . Assessment of Noise Pollution along Two Main Avenues in Curitiba, Brazil. **Open Journal Of Acoustics**, v. 09, p. 26-38, 2019.

**APÊNDICE A – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI  
COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 20 %  
DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS**





**APÊNDICE B – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI  
COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 50 %  
DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS**



**APÊNDICE C – MAPEAMENTO ACÚSTICO DO AEROPORTO BACACHERI  
COM MEDIDA MITIGATÓRIA DE REDUÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO EM 70 %  
DAS AERONAVES NÃO CERTIFICADAS**

